

---

# **BACHELORARBEIT**

---

Herr  
**Benjamin Swistek**

**Untersuchungen zur  
Granulierung von mit  
Naturstoffen hochgefüllten  
Kunststoffen**

Mittweida, 2014



---

# **BACHELORARBEIT**

---

## **Untersuchungen zur Granulierung von mit Naturstoffen hochgefüllten Kunststoffen**

Autor:

**Herr Benjamin Swistek**

Studiengang:

**Maschinenbau - Fertigungstechnik**

Seminargruppe:

**MB11wF-B**

Erstprüfer:

**Prof. Dr.-Ing. Eckhard Wißuwa**

Zweitprüfer:

**Dipl.-Ing. Franziska Seidel**

Einreichung:

**Mittweida, 2014**

Verteidigung/Bewertung:

**Mittweida, 2014**



**Bibliografische Beschreibung:**

Swistek, Benjamin: Untersuchungen zur Granulierung von mit Naturstoffen hochgefüllten Kunststoffen, 38 Seiten, 25 Abbildungen, Hochschule Mittweida, Fakultät Maschinenbau

Bachelorarbeit, 2014

**Referat:**

Die moderne Kunststoffverarbeitung versucht Ressourcen einzusparen. Ein Ansatz dieser Bemühung gerecht zu werden ist der Einsatz von Nature Plastic Compounds. Hierbei ist die Verarbeitung und anschließende Granulierung auf einem Kurzschneckenextruder relativ neu. Ziel dieser Arbeit ist es, einen Kurzschneckenextruder mit einer Granuliereinheit für die Granulierung von Nature Plastic Compounds zu versehen.



# Inhalt

<b>Inhalt.....</b>	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>III</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>V</b>
<b>Formelverzeichnis.....</b>	<b>VII</b>
<b>Kurzzeichenverzeichnis.....</b>	<b>IX</b>
<b>1     Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1    Motivation.....	1
1.2    Zielsetzung.....	1
1.3    Kapitelübersicht.....	2
<b>2     Grundlagen der Granulierung.....</b>	<b>3</b>
2.1    Heißgranulierung.....	3
2.2    Kaltgranulierung.....	5
<b>3     Stand der Technik.....</b>	<b>7</b>
3.1    Extruder.....	7
3.2    Granuliereinheit.....	8
<b>4     Konstruktion.....</b>	<b>11</b>
4.1    Gründe für die Neukonstruktion.....	11
4.2    Anforderungen an die Neukonstruktion.....	12
4.3    Beschreibung der eigenen Konstruktion.....	12
4.3.1   Düsenplatte.....	12
4.3.2   Düseneinsatz.....	15
4.3.3   Granuliermesser.....	17
4.3.4   Funktionsweise.....	17
4.3.5   Berechnungen zur Kühlung.....	18

---

4.4	Beschreibung der überarbeiteten Konstruktion.....	21
4.4.1	Düsenplatte.....	21
4.4.2	Düseneinsatz.....	23
4.4.3	Funktionsweise.....	25
4.4.4	Berechnungen zur Kühlung.....	25
<b>5</b>	<b>Versuche.....</b>	<b>29</b>
5.1	Zielstellung.....	29
5.2	Erwartungen.....	30
5.3	Versuchsdurchführung.....	32
5.4	Vergleich zwischen den berechneten und gemessenen Granulattemperaturen.....	33
5.5	Auswertung der Versuche.....	34
<b>6</b>	<b>Fazit und Ausblick.....</b>	<b>37</b>
	<b>Literatur.....</b>	<b>39</b>
	<b>Anlagen.....</b>	<b>41</b>
	<b>Selbstständigkeitserklärung.....</b>	<b>47</b>



# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.0: Unterwassergranulierung.....	4
Abbildung 2.1: Wasserringgranulierung.....	4
Abbildung 2.2: Trockenschnittgranulierung.....	5
Abbildung 2.3: Unterwasserstranggranulierung.....	6
Abbildung 3.0: Extruder Schema.....	7
Abbildung 3.1: Messerhalterung und Granuliermesser (Stand der Technik).....	8
Abbildung 3.2: Düsenplatte (Stand der Technik).....	8
Abbildung 3.3: Düseneinsatz (Stand der Technik).....	9
Abbildung 4.0: Düsenplatte, Ansicht 1 (eigene Konstruktion).....	13
Abbildung 4.1: Düsenplatte, Ansicht 2 (eigene Konstruktion).....	13
Abbildung 4.2: Düsenplatte, Ansicht 3 (eigene Konstruktion).....	14
Abbildung 4.3: Düseneinsatz, Ansicht 1 (eigene Konstruktion).....	15
Abbildung 4.4: Düseneinsatz, Abbildung 2 (eigene Konstruktion).....	16
Abbildung 4.5: Düseneinsatz, Ansicht 3 (eigene Konstruktion).....	16
Abbildung 4.6: Granuliermesser (eigene Konstruktion).....	17
Abbildung 4.7: Baugruppe (eigene Konstruktion).....	17
Abbildung 4.8: Düsenplatte, Ansicht 1 (überarbeitete Konstruktion).....	22
Abbildung 4.9: Düsenplatte, Ansicht 2 (überarbeitete Konstruktion).....	22
Abbildung 4.10: Düsenplatte, Ansicht 3 (überarbeitete Konstruktion).....	23
Abbildung 4.11: Düseneinsatz, Ansicht 1 (überarbeitete Konstruktion).....	24
Abbildung 4.12: Düseneinsatz, Ansicht 2 (überarbeitete Konstruktion).....	24
Abbildung 4.13: Düseneinsatz, Ansicht 3 (überarbeitete Konstruktion).....	25

Abbildung 5.0: Granuliereinheit.....29

Abbildung 5.1: Granulat.....33

Abbildung 5.2: Vergleich der Granulattemperaturen.....34

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.0: Verwendete Werte (eigene Konstruktion).....	18
Tabelle 4.1: Verwendete Werte (überarbeitete Konstruktion).....	26
Tabelle 5.0: Versuchsplan.....	30
Tabelle 5.1: Zielgrößen.....	31
Tabelle 5.2: Erwartete Granulattemperaturen.....	31
Tabelle 5.3: gemessene Granulattemperaturen.....	32



# Formelverzeichnis

Gleichung 4.0: Wärmeenergie der Schmelze (eigene Konstruktion).....	19
Gleichung 4.1: Wärmeleitung Düse (eigene Konstruktion).....	20
Gleichung 4.2: Wärmeübergangskoeffizient (eigene Konstruktion).....	20
Gleichung 4.3: Wärmeübertragung Kühlkörper (eigene Konstruktion).....	20
Gleichung 4.4: Strangtemperatur nach Düse (eigene Konstruktion).....	21
Gleichung 4.5: Wärmeenergie der Schmelze (überarbeitete Konstruktion).....	27
Gleichung 4.6: Wärmeleitung Düse (überarbeitete Konstruktion).....	27
Gleichung 4.7: Wärmeübergangskoeffizient (überarbeitete Konstruktion).....	27
Gleichung 4.8: Wärmeübertragung Kühlkörper (überarbeitete Konstruktion).....	28
Gleichung 4.9: Strangtemperatur nach Düse (überarbeitete Konstruktion).....	28



# Kurzzeichenverzeichnis

Kurzzeichen	Einheit	Bezeichnung/ Definition
NPC		Nature Plastic Compound
CAD		computer-aided design
$\theta$	$[^{\circ}\text{C}]$	Temperatur
d	$[\text{mm}]$	Durchmesser
$\dot{m}$	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{h}}\right]$	Massestrom
c	$\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}\right]$	spezifische Wärmekapazität
l	$[\text{mm}]$	Länge
$\lambda$	$\left[\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}\right]$	Wärmeleitfähigkeit
r	$[\text{mm}]$	Radius
v	$\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$	Strömungsgeschwindigkeit
A	$[\text{mm}^2]$	Oberfläche
n	$[\text{min}^{-1}]$	Drehzahl





# 1 Einleitung

Im einleitenden Kapitel werden zunächst die Motivation und die Zielsetzung dieser Bachelorarbeit kurz dargelegt. Abschließend erfolgt ein Überblick über die einzelnen Kapitel dieser Arbeit.

## 1.1 Motivation

Thermoplastischer Kunststoff erfreut sich zur heutigen Zeit einer immer größer werdenden Beliebtheit. Dies kann aufgrund des geringen Gewichtes, der guten Verarbeitbarkeit, der vielfältigen Eigenschaften oder der Recyclebarkeit sein. Da sich zur heutigen Zeit das Umweltbewusstsein immer weiter ausbaut wird versucht, so wenig wie möglich fossile Ressourcen zu verbrauchen. Dies betrifft somit auch die aus Erdöl hergestellten synthetischen Thermoplaste. Ein Thermoplast ist ein Kunststoff, welcher sich in einem definierten Temperaturbereich reversibel verformen lässt. Hier wird eine Verringerung der benötigten Mengen des Materials angestrebt. Dazu werden die synthetischen Kunststoffe zum Beispiel mit Naturstoffen wie Maisgrieß, Roggenkleie, Haferspelzen oder Weizenkleie gefüllt, was sogenannte Nature Plastic Compounds (kurz: NPC's) ergibt. Somit steigt die Nachhaltigkeit und zusätzlich ergeben sich durch die niedrigeren Materialkosten der Füllstoffe auch preisliche Vorteile. Dies macht die Produkte für den modernen Kunststoffverarbeiter zunehmend interessanter. Hier steht man jedoch noch vor dem Problem, dass die Compoundierung dieser Gemische relativ neu ist, da sich die Maschinenteknik zum großen Teil auf Kunststoffe konzentriert. Dies macht es schwierig, technisch und wirtschaftlich lohnende Varianten zu nutzen.

## 1.2 Zielsetzung

Die Granulierung von mit Naturstoffen hochgefüllten Kunststoffen gestaltet sich als schwierig. Dies begründet sich in der Maßgabe, möglichst wenig oder kein Wasser zu verwenden um ein Aufschäumen des Thermoplasts zu verhindern. So ist es Ziel dieser Bachelorarbeit, den bestehenden Kurzschneckenextruder mit einer Granuliereinheit für die Granulierung von NPC's zu versehen. Abschließend werden Versuche mit dieser durchgeführt und ausgewertet. Granuliert werden sollen Compounds<sup>1</sup> mit idealerweise zwanzig Prozent Kunststoff und achtzig Prozent Naturstoff.

---

<sup>1</sup> Compound = homogene makromolekulare Mischung aus Polymer und Additiv [8]

## 1.3 Kapitelübersicht

**Kapitel 1:** Das erste Kapitel gibt einen Überblick über die Thematik der Verarbeitung von NPC's. Zudem wird die Motivation für diese Arbeit dargelegt und die Zielsetzung erklärt. Abschließend folgt in diesem Punkt eine Kapitelübersicht.

**Kapitel 2:** Dieser Abschnitt stellt die Grundlagen der Kunststoffgranulierung dar. Hierbei wird zunächst die Heiß- und Kaltgranulierung vorgestellt. Anschließend werden die wichtigsten Verfahren dieser Hauptverfahren kurz beschrieben.

**Kapitel 3:** Im dritten Kapitel wird der Stand der Technik vorgestellt. Dabei wird auf den vorhandenen Extruder und die vorhandene Granuliereinheit eingegangen.

**Kapitel 4:** In diesem Abschnitt wird auf die neue Konstruktion eingegangen. Zunächst werden die Gründe für die Neukonstruktion und die Anforderungen an diese dargelegt. Danach folgt die Vorstellung der selbst erstellten Konstruktion. Abschließend wird die von einem Konstrukteur überarbeitete Granuliereinheit beschrieben. In diesem Kapitel werden zudem die Berechnungen zur Kühlung durchgeführt.

**Kapitel 5:** Das fünfte Kapitel behandelt die durchgeführten Versuche. Hierbei werden zunächst die Erwartungen an das Ergebnis beschrieben. Anschließend werden die durchgeführten Versuche dargelegt und ein Vergleich mit den Erwartungen gezogen.

**Kapitel 6:** Im letzten Abschnitt wird ein Fazit über die durchgeführten Versuche gezogen. Abschließend wird ein Ausblick über den weiteren Verlauf des Themas und Maßnahmen zur Verbesserung der Anlage gegeben.

## 2 Grundlagen der Granulierung

In folgendem Abschnitt werden grundlegende Begriffe zur Granulierung beschrieben. Zudem werden verschiedenen Granulierverfahren kurz beschrieben.

Je nach Verfahren liegt ein Thermoplast nach seiner Herstellung in unterschiedlichen Formen vor. Dies kann eine Schmelze, ein Pulver oder ein Gieß [1, S. 3] sein. Das bedeutet bei der Verarbeitung ein unterschiedliches Einzugsverhalten. Um dennoch eine von der Erzeugung unabhängige Form zu erhalten schließt sich nach der Extrusion nun der Schritt des Granulierens an. Hierbei wird das Ausgangsmaterial nach dem Schritt der Extrusion durch Heiß- oder Kaltgranulierung zu einem Granulat geformt, womit sich das Einzugsverhalten kaum noch unterscheidet. Zudem ergibt sich bei der Herstellung von NPC's der Vorteil, dass im Compound Naturstoff und Kunststoff in gewünschter Menge homogen vermischt sind. So ist die Gefahr des Entmischens bei weiterer Verwendung oder Vermischung geringer als bei der direkten Zumischung eines Naturstoffs.

### 2.1 Heißgranulierung

Bei der Heißgranulierung wird der aus einer an den Extruder angebrachten Lochplatte austretende Schmelzestrang direkt nach dem Austritt durch rotierende Messer geschnitten. Dies kann trocken oder nass (unter Einsatz von Kühlfluid) erfolgen. Abschließend folgt eine Kühlung durch ein Gas (z.B. Luft) oder eine Flüssigkeit (z.B. Wasser) [1, S. 8].

Die Problematik ist hier in der Vermeidung der Mehrkornbildung<sup>2</sup> zu sehen, da die Granulatkörner bei unzureichender Kühlung zusammenkleben.

Das Granulat bildet eine Kugel- oder Linsenform [1, S. 3], da die geringste Oberfläche angestrebt wird.

In den folgenden Punkten werden die verschiedenen Verfahren der Heißgranulierung kurz erklärt.

#### Unterwassergranulierung

Wie in Abbildung 2.0 dargestellt gelangt die Schmelze bei der Unterwassergranulierung bei dem Austritt aus den Düsen der Lochplatte in eine mit Wasser durchströmte Abtrennkammer. Dort wird sie durch ein rotierendes Messersystem abgetrennt. Anschließend spült das Wasser das Granulat zu einem Trockner. Durch diesen werden die Wasserrückstände entfernt [2].

---

<sup>2</sup> Mehrkornbildung = Zusammenkleben mehrerer Granulatkörner durch Eingehen einer stoffschlüssigen Verbindung

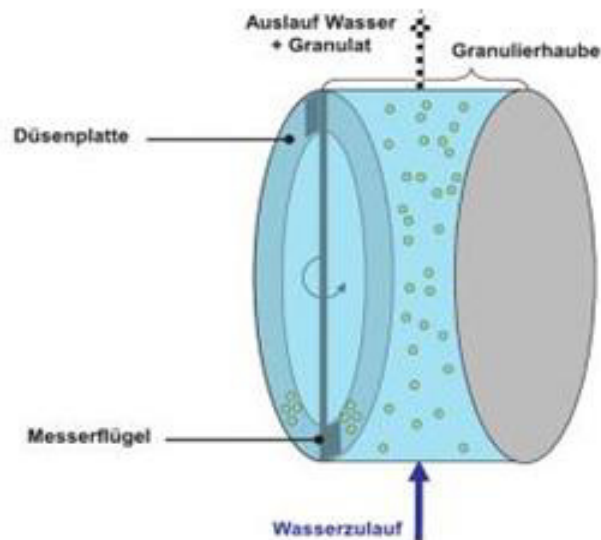


Abbildung 2.0: Unterwassergranulierung [3, S. 530]

### Wasserringgranulierung

In Abbildung 2.1 wird der Ablauf der Wasserringgranulierung dargestellt. Die Schmelze wird nach dem Austritt aus der Lochplatte trocken abgetrennt. Anschließend wird das Granulat durch die Zentrifugalkraft des Messers aus dem Abtrennbereich in einen Wasserring geschleudert, in welchem es abkühlt. Durch das Wasser wird das Granulat weiter zu einem Trockner gespült, von dem schließlich die Wasserrückstände entfernt werden [4].

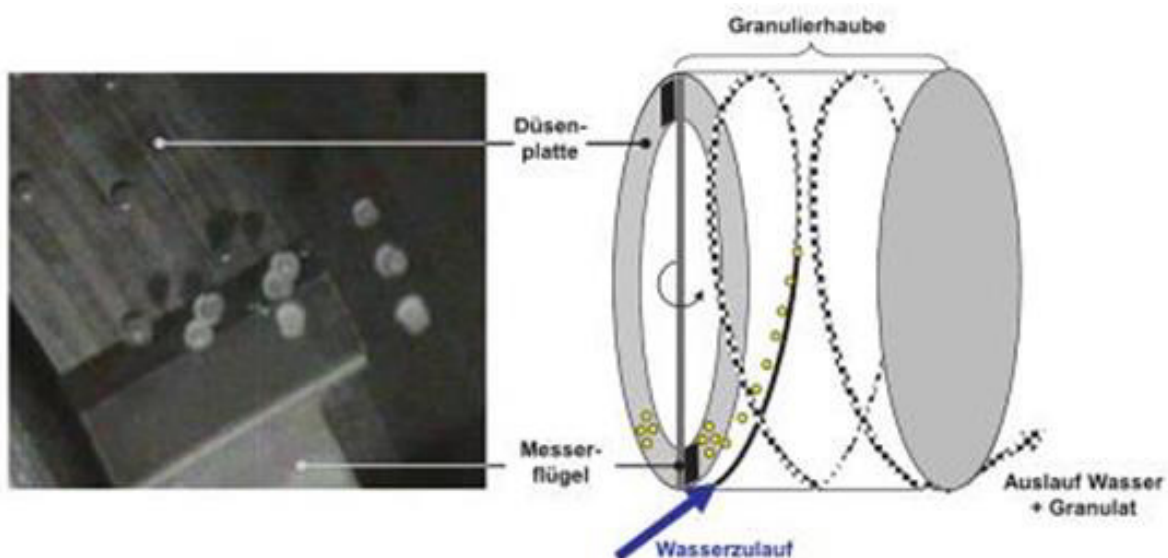


Abbildung 2.1: Wasserringgranulierung [3, S. 529]

### Kühlluftgranulierung

Bei der Kühlluftgranulierung wird die Schmelze nach dem Austritt aus den Düsen der Lochplatte durch ein Messersystem trocken abgetrennt. Im Folgenden wird das Granulat

weiter gefördert und durch Luft gekühlt, was durch die geringe Wärmeleitfähigkeit von Luft gegenüber Wasser demnach länger dauert [1, S. 403].

## 2.2 Kaltgranulierung

Die Kaltgranulierung ist mit der Heißgranulierung zu vergleichen, nur das hierbei der Strang zunächst gekühlt und anschließend erst abgetrennt wird. Die Kühlung kann, wie bei der Heißgranulierung, ebenfalls durch ein Gas oder eine Flüssigkeit erfolgen.

Da der Strang beim Abtrennen schon abgekühlt ist entfällt die Problematik der Mehrkornbildung. Das Granulat liegt nach dem Trennen zylinderförmig vor.

In den folgenden Punkten werden die verschiedenen Verfahren der Kühlluftgranulierung kurz erklärt.

### Fluidbettgranulierung

Hierbei wird die Schmelze durch eine balkenförmige Lochplatte extrudiert. Anschließend durchlaufen die Stränge eine Kühlstrecke, das sogenannte Fluidbett. In diesem werden sie über eine Kühlung mit einem Gas langsam abgekühlt und gleichzeitig verstreckt. Danach durchlaufen die Stränge eine Intensivkühlstrecke, in der sie mit Wasser abgeschreckt werden. Daraufhin folgt die Granulierung durch eine Granulierwalze [5].

### Trockenschnittgranulierung

Bei der Trockenschnittgranulierung (Abbildung 2.2) wird die Schmelze durch eine balkenförmige Lochplatte extrudiert. Anschließend werden die Stränge durch eine Flüssigkeit oder ein Gas gekühlt. Sollte mit einer Flüssigkeit gekühlt worden sein wird diese im Anschluss von den Strängen abgesaugt. Abschließend werden die Stränge durch eine Granulierwalze granuliert [1, S. 403].



Abbildung 2.2: Trockenschnittgranulierung [9]

## Unterwasserstranggranulierung

Hierbei wird die Schmelze durch eine balkenförmige Lochplatte extrudiert. Wie in Abbildung 2.3 dargestellt werden die Stränge durch eine Wanne geführt, in der sie mit Wasser gekühlt werden. Die Stränge und das Wasser passieren anschließend eine Granulierwalze, welche die Stränge granuliert. Danach wird das Granulat-Wasser-Gemisch weiter in eine Nachkühlstrecke gefördert und abschließend getrocknet [6].

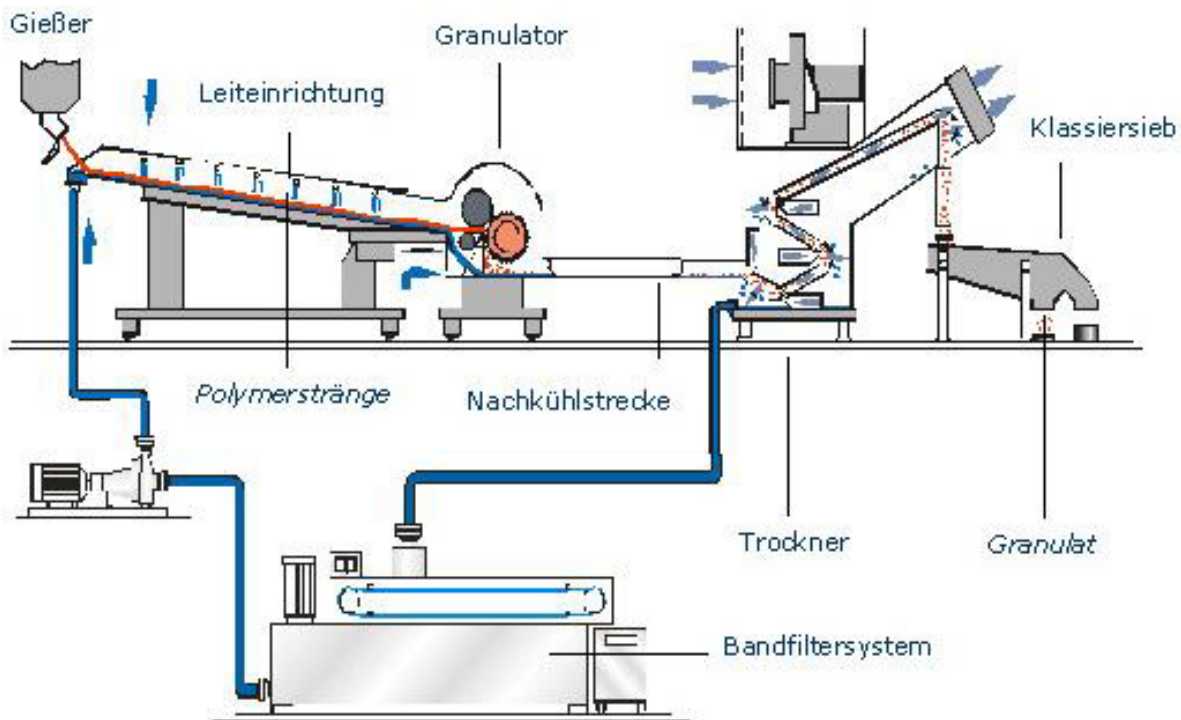


Abbildung 2.3: Unterwasserstranggranulierung [6]

### 3 Stand der Technik

In folgendem Abschnitt wird die Ausgangssituation des Extruders und der Granuliereinheit kurz beschrieben.

#### 3.1 Extruder

Aktuell wird ein Kurzschneckenextruder verwendet, welcher schematisch in Abbildung 3.0 dargestellt ist. Das Material wird durch den Einfülltrichter über eine eingängige Dosierschnecke (2) der Extruderschnecke (4) zugeführt. Die Drehzahl der Extruderschnecke ist in zehn Stufen einstellbar. Die Extruderschnecke ist viergängig und linkssteigend, der Extruderzylinder (5) ist zweigängig und rechtssteigend. Abschließend befindet sich die Düsenplatte (6) mit dem Düseneinsatz (7) am Extruder. Die Düsenplatte wird über zwei Heizpatronen mit jeweils 1000W beheizt. Die Ziffern (1) und (3) zeigen die antreibenden Elektromotoren.

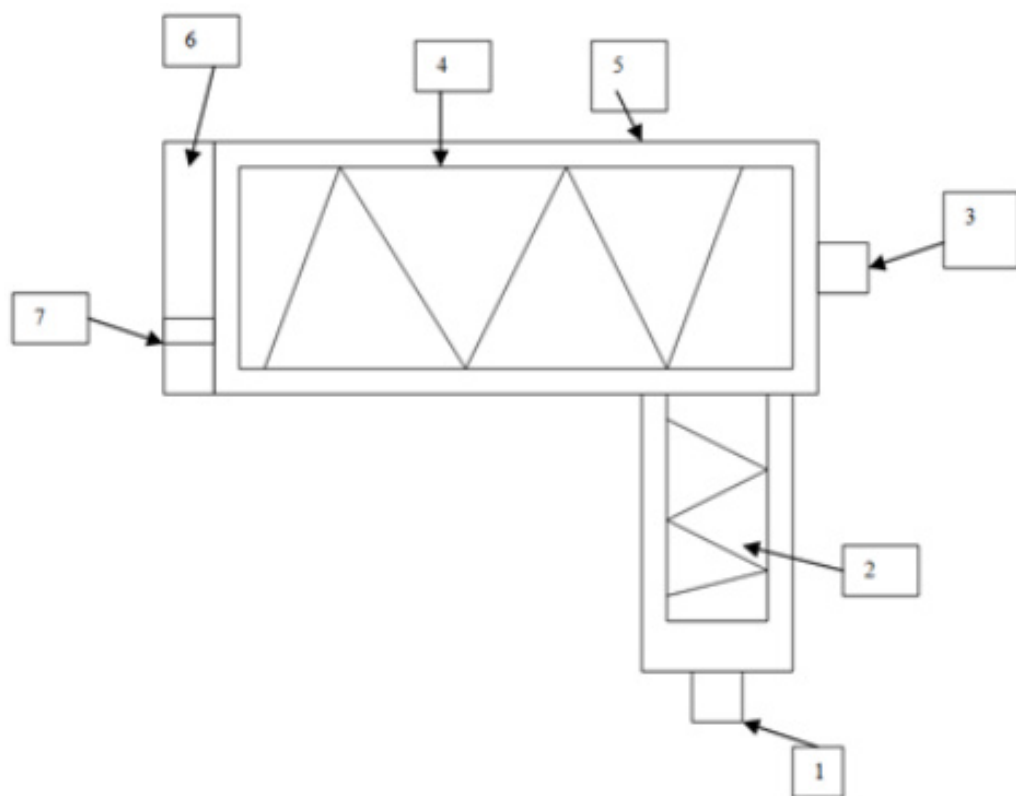


Abbildung 3.0: Extruder Schema [7]

## 3.2 Granuliereinheit

Die vorhandene Granuliereinheit wurde zum Granulieren von Naturstoff-Verpackungschips verwendet. Der antreibende Elektromotor wird samt der Messerhalterung und der Granuliermesser (Abbildung 3.1) über eine Spannfeder an die Düsenplatte (Abbildung 3.2) angepresst. In die Öffnung (Abbildung 3.2, (1)) der Düsenplatte wird ein Düseneinsatz (Abbildung 3.3) eingesetzt. Das Messersystem besteht aus vier Messerklingen, die an einer Messerhalterung über Schrauben angebracht sind. Die Messerhalterung wird auf der Motorwelle befestigt. Durch die Geometrie der Granuliermesser ist ein direktes Anliegen an der Düsenplatte nicht möglich, da die mittlere Schraube (Abbildung 3.1, (1)) vor den Messerklingen hervorsteht. Zudem sind die vorhandenen Granuliermesser abgenutzt.



Abbildung 3.1: Messerhalterung und Granuliermesser (Stand der Technik)



Abbildung 3.2: Düsenplatte (Stand der Technik)





**Abbildung 3.3: Düseneinsatz (Stand der Technik)**

Der in Abbildung 3.3 dargestellte Düseneinsatz liegt in drei Varianten mit drei verschiedenen Bohrungs-Durchmessern vor. Es existiert ein 2,5mm-Einsatz, ein 4mm-Einsatz und ein 6mm-Einsatz. Der Düseneinlauf verjüngt sich konisch bis auf den geforderten Düsendurchmesser.



## 4 Konstruktion

In folgendem Kapitel werden die erstellten Konstruktionen beschrieben. Es wird zunächst auf die Gründe und die Anforderungen für die Neukonstruktion eingegangen. Danach wird die eigene Konstruktion der Granuliereinheit beschrieben. Abschließend folgt die Beschreibung der finalen Version, welche durch einen Konstrukteur überarbeitet wurde. Zur Konstruktion wurde das CAD-System SolidWorks verwendet.

### 4.1 Gründe für die Neukonstruktion

Der vorhandene Kurzschneckenextruder inklusive der vorhandenen Granuliereinheit wurde früher zur Herstellung von Verpackungschips aus Naturstoffen verwendet. Somit ist er für einen optimalen Granulierungsprozess<sup>3</sup> von NPC's nicht ausgelegt.

Dies beginnt zunächst bei der fehlenden Kühlung am Extrudereinzug. Das hat zur Folge, dass kleine Materialpartikel wie zum Beispiel bei einem Kunststoffpulver bei längerem Extruderbetrieb durch die stetige Erwärmung des Gehäuses schon im Einzug anschmelzen. Somit ist eine weitere Förderung des Materials nicht oder nur bedingt möglich, da der Einzug verstopft. Dadurch wird der Einsatz eines Kunststoffs in Pulverform ausgeschlossen.

Weiterhin ist keine funktionierende Temperierung am Zylinder vorhanden. Dadurch ist eine kontrollierte und regelbare Temperaturführung nicht möglich. Diese wird aber benötigt um die vorgegebenen Verarbeitungstemperaturen des Kunststoffs einzuhalten und eine thermische Schädigung der Naturstoffe zu verhindern.

Die vorhandene Düsenplatte ist zum Extrudieren und Granulieren von NPC's geeignet. Jedoch fehlt hier eine integrierte oder nachfolgende Kühlung, welche für den optimalen Granulierungsprozess unerlässlich ist. Somit würde es zu einer Mehrkornbildung kommen.

Die Granuliermesser sind geometrisch für die Granulierung von NPC's geeignet, jedoch liegen die Klingen durch die geringe Dicke der Messer und durch die Geometrie des Messerhalters nicht an der Düsenplatte an, wodurch es zu einem Verschmieren statt einem Abtrennen des austretenden Compounds kommen würde.

---

<sup>3</sup> optimaler Granulierungsprozess = keine thermische Schädigung des Materials, vollständiges Aufschmelzen des Kunststoffs, keine Mehrkornbildung, problemloser Einzug der Ausgangsmaterialien

## 4.2 Anforderungen an die Neukonstruktion

Bei der Neukonstruktion der Extruderteile und der Granuliereinheit sind verschiedene Dinge zu beachten. Zunächst sollte bei der Extrusion darauf geachtet werden, dass ein dauerhaft homogener Einzug gewährleistet ist und sich Naturstoff und Kunststoff nicht entmischen. Zudem dürfen weder Kunststoff noch Naturstoff thermisch geschädigt werden. Der Kunststoff muss jedoch auch vollständig aufschmelzen.

Um die Mehrkornbildung nach dem Abtrennen durch die Messer zu verhindern sollte die Erweichungstemperatur unterschritten oder zumindest erreicht werden. Dazu sollte eine Kühlung des Strangs vorgesehen werden. Hierbei ist jedoch auf einen direkten Wasserkontakt zu verzichten, da in diesem Fall der Naturstoff Wasser aufnimmt. Dies führt dazu, dass eine anschließende Trocknung notwendig ist. Bei längerem Wasserkontakt ist jedoch nicht sichergestellt, dass das Wasser dadurch restlos entfernt wird.

Nach dem Granulierprozess muss das Granulat zu einem Abfüllbehältnis gefördert werden.

## 4.3 Beschreibung der eigenen Konstruktion

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Teile der eigenen Konstruktion beschrieben. Danach folgt eine Erläuterung der Funktionsweise der Baugruppe. Abschließend werden die Berechnungen zu der Kühlung durchgeführt.

### 4.3.1 Düsenplatte

In Abbildung 4.0 bis 4.2 ist die Düsenplatte dargestellt. Abbildung 4.0 stellt das ungeschnittene Bauteil dar, Abbildung 4.1 zeigt einen Schnitt im Radius, in Abbildung 4.2 ist der Schnitt auf Höhe der Kanäle gesetzt. Die Düsenplatte sollte aus dem nitrierten Werkstoff X153CrMoV12 (Werkstoff-Nummer: 1.2379, Datenblatt: Anhang A-I) gefertigt werden. Dieser Werkstoff besitzt eine Härte von  $62 \pm 2 \text{HRC}$ . Somit ist die Düsenplatte härter als die Granuliermesser aus dem Werkstoff X17CrNi16-2 (Werkstoff-Nummer: 1.4057, Datenblatt: Anhang A-I) mit einer Härte von 35HRC. Dies bedeutet, dass die Messer vor der Düsenplatte verschleßen. Somit muss nicht die teurere Düsenplatte als Verschleißteil ausgetauscht werden, sondern die Messer.

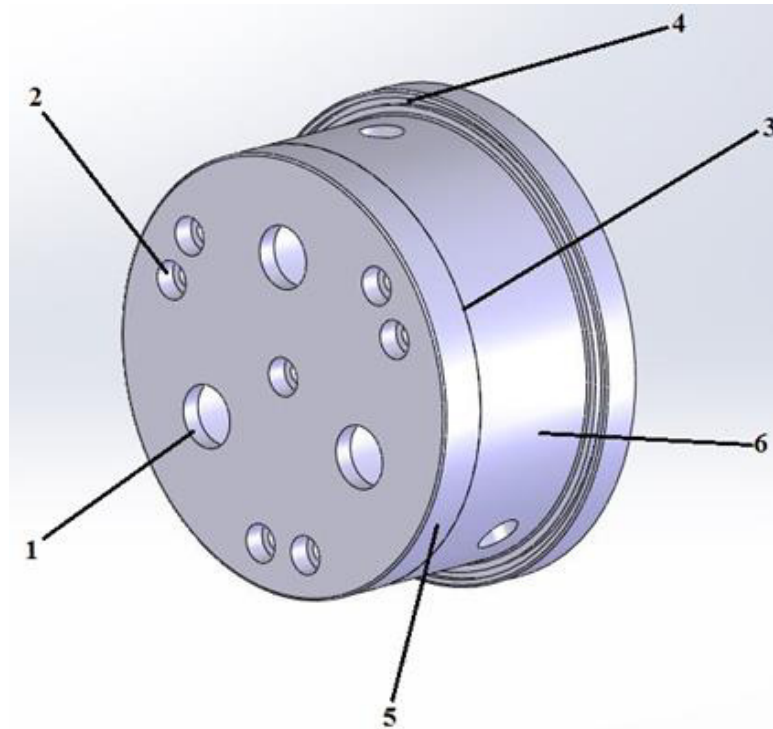


Abbildung 4.0: Düsenplatte, Ansicht 1 (eigene Konstruktion)

Die Düsenplatte (Abbildung 4.0) besteht aus fertigungstechnischen Gründen aus zwei Teilen (5) und (6). Die zwei Teile der Düsenplatte aus Abbildung 4.0 werden dichtend zusammengefügt (3). Durch die Bohrungen (2) werden die beiden Teile mit Schrauben verbunden. Die drei Öffnungen (1) werden in der Baugruppe von den Düseneinsätzen ausgefüllt. Zur Dichtung zwischen Düsenplatte und jener Platte, in die die Düsenplatte eingesetzt wird, dient die Nut (4). Abgedichtet wird durch einen O-Ring.

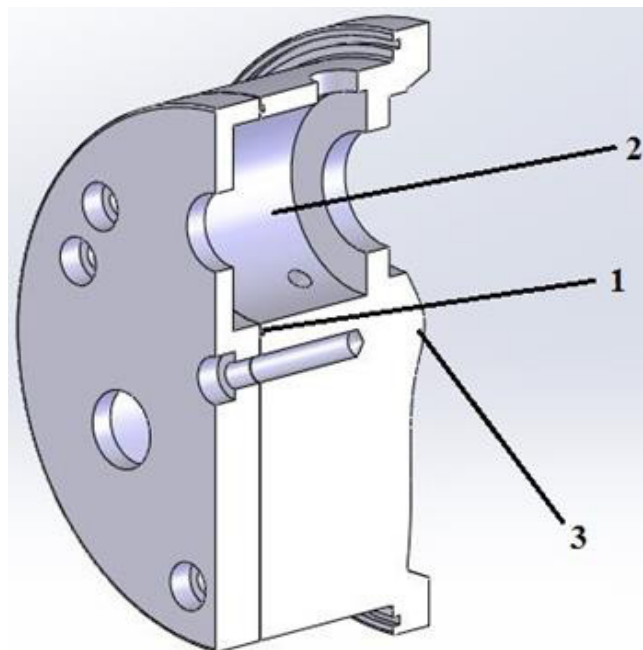


Abbildung 4.1: Düsenplatte, Ansicht 2 (eigene Konstruktion)

Die Einzelteile der Düsenplatte in Abbildung 4.1 werden durch O-Ringe (1) abgedichtet. Um eine passive Kühlung durch Wärmeleitung und Konvektion zu realisieren wurden Kammern (2) geschaffen, die mit Wasser durchströmt werden. Somit wird ein direkter Wasserkontakt vermieden und trotzdem eine Kühlmöglichkeit des Stranges realisiert. Die Kammern können durch die Zweiteilung der Düsenplatte geschaffen werden. Da in der Mitte der Plastifizierschnecke die Umfangsgeschwindigkeit gleich Null ist wurde an der Düsenplatte eine Wölbung (3) vorgesehen. Dadurch wird die Verweilzeit des Materials an dieser Stelle minimiert und bessere Fließbedingungen für die Schmelze geschaffen da der Abstand zwischen Schnecke und Düsenplatte nur 1mm statt 4mm beträgt.

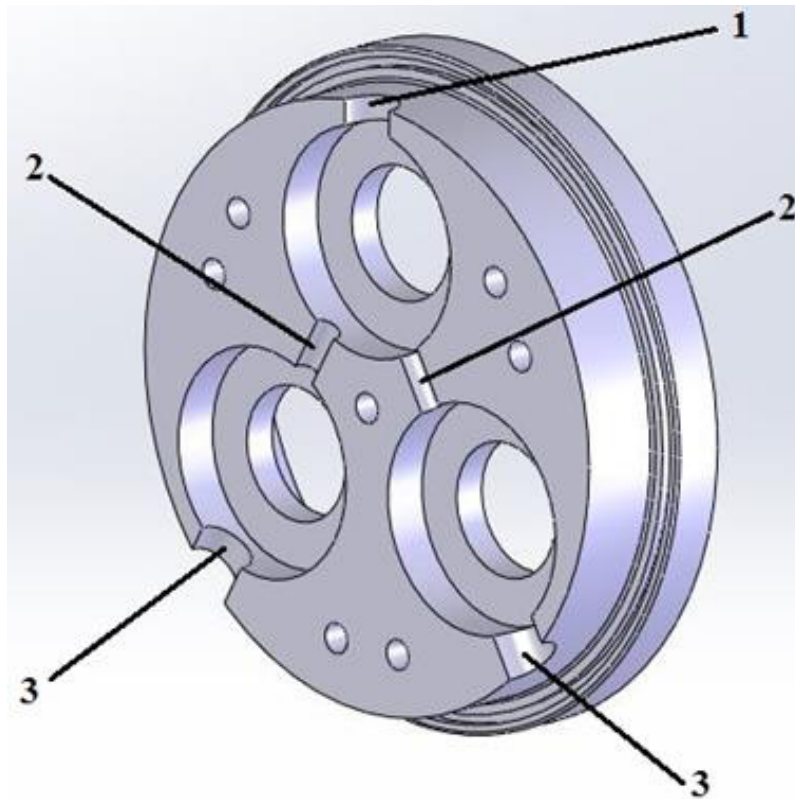


Abbildung 4.2: Düsenplatte, Ansicht 3 (eigene Konstruktion)

In Abbildung 4.2 ist die Düsenplatte auf Höhe der Kanäle geschnitten. Die im letzten Abschnitt beschriebenen Kammern (Abbildung 4.1, (2)) werden durch Öffnung (1) mit Wasser befüllt. Dieses strömt in die obere Kammer und trifft mittig auf die erste Düse. Die in der Firma verwendeten Wasserverteiler begrenzen den Volumenstrom des Wassers auf  $6 \frac{l}{min}$ . Nachdem es den Düseneinsatz umströmt hat tritt es durch die Öffnungen (2) in die nachfolgenden Kammern ein. Dort trifft der Wasserstrom wieder mittig auf die unteren Düsen, umströmt diese und verlässt durch die Öffnungen (3) die Düsenplatte. Die Kammern werden in Reihe angesteuert um möglichst wenige Anschlüsse an der Düsenplatte zu verwenden. Somit werden an der Düsenplatte drei Wasseranschlüsse benötigt, ein Zulauf und zwei Abläufe.

### 4.3.2 Düseneinsatz

In den Abbildungen 4.3 bis 4.5 ist ein Düseneinsatz dargestellt. Abbildung 4.3 stellt das ungeschnittene Bauteil dar, in Abbildung 4.4 wurde im Radius geschnitten. Das ungeschnittene Bauteil in der Rückansicht ist in Abbildung 4.5 dargestellt. Es wurden Einsätze statt fest integrierter Düsen vorgesehen um eine größere Variationsbreite an Versuchsmöglichkeiten zu geben. Dadurch kann beispielsweise der Druck erhöht werden, indem statt eines Düseneinsatzes ein Blindeinsatz eingesetzt wird. Zudem kann so kostengünstiger der Strangdurchmesser verändert werden, indem eine andere Düse eingesetzt wird. Die Düseneinsätze sollten aus der hochfesten Aluminiumlegierung CERTAL (AlZn5Mg3Cu) gefertigt werden (Datenblatt: Anhang A-I). Somit kann durch deren im Vergleich zu anderen Aluminiumwerkstoffen hohen Festigkeit und Härte dem abrasiven Verschleiß durch die Granuliermesser standgehalten und gleichzeitig eine gute Wärmeleitfähigkeit garantiert werden.

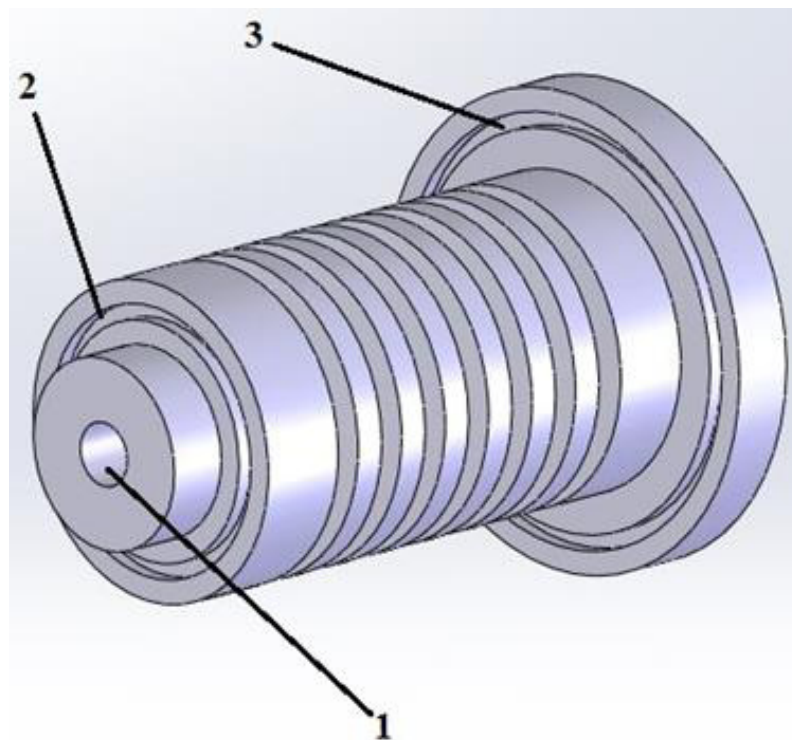
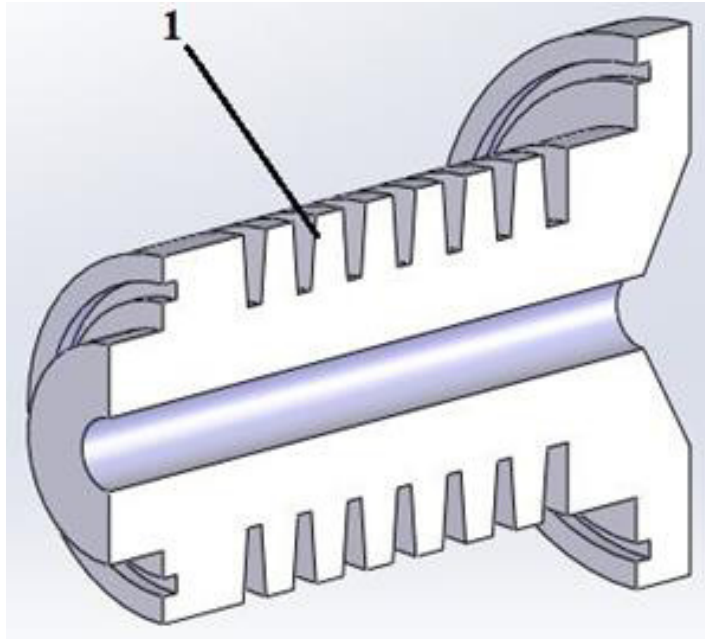


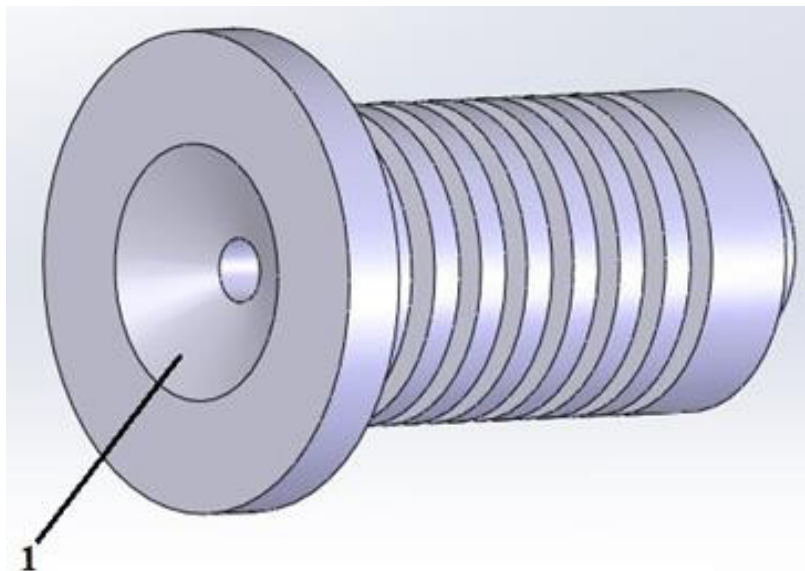
Abbildung 4.3: Düseneinsatz, Ansicht 1 (eigene Konstruktion)

Der Düseneinsatz aus Abbildung 4.3 wird in die Öffnungen (Abbildung 4.0, (1)) der Düsenplatte eingesetzt. Durch die Bohrung mit dem Durchmesser 4mm (1) wird das NPC-Material geleitet. Die Nuten (2) und (3) dienen für O-Dichtungsringe. Diese realisieren die Abdichtung zwischen Düsenplatte und Düseneinsatz um ein Austreten des Kühlwassers oder ein Eintreten der Schmelze in die Kühlwasserkammern zu verhindern.



**Abbildung 4.4: Düseneinsatz, Abbildung 2 (eigene Konstruktion)**

Um den Effekt eines Kühlkörpers zu erhalten wurden an dem Düseneinsatz, Abbildung 4.4, umlaufende Kühlrippen (1) realisiert. Somit besteht eine große Oberfläche, was den Effekt der Kühlung erhöht. Dadurch wird innerhalb der Düsenplatte eine Kühlmöglichkeit für den Strang geschaffen und gleichzeitig auf einen direkten Wasserkontakt verzichtet.



**Abbildung 4.5: Düseneinsatz, Ansicht 3 (eigene Konstruktion)**

In Abbildung 4.5 ist die Düse in der Rückansicht dargestellt. Der zum Düseneinlass zulaufende Konus (1) wurde vorgesehen, um bessere Fließbedingungen für die Schmelze zu schaffen. Somit wird die Gefahr des Anstauens der Naturstoff-Fasern verringert, da sich diese durch die vorgegebene Fließrichtung zu der Düsenöffnung hin ausrichten.



### 4.3.3 Granuliermesser

Die Granuliermesser wurden geometrisch so belassen wie die schon vorhandenen Messer. Es wurde nur die Dicke der Messer erhöht um diese plan an der Düsenplatte anliegen zu lassen.

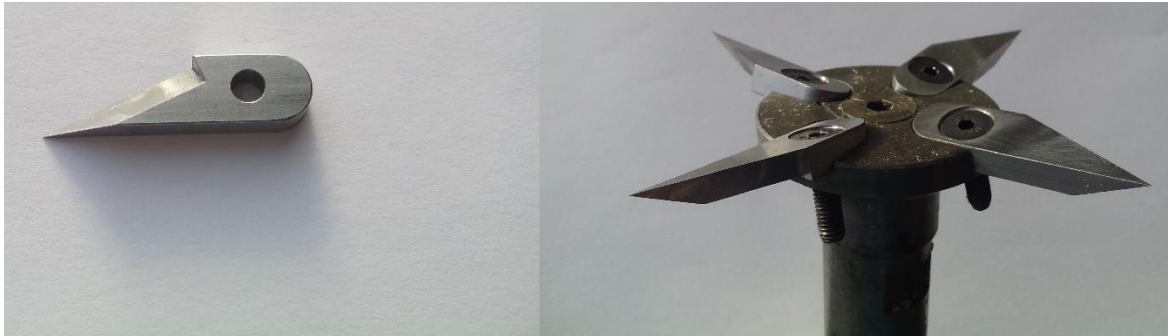


Abbildung 4.6: Granuliermesser (eigene Konstruktion)

### 4.3.4 Funktionsweise

In Abbildung 4.7 ist die komplette Baugruppe Granuliereinheit ohne das Messersystem dargestellt. Anhand dieser wird die Funktionsweise erläutert.

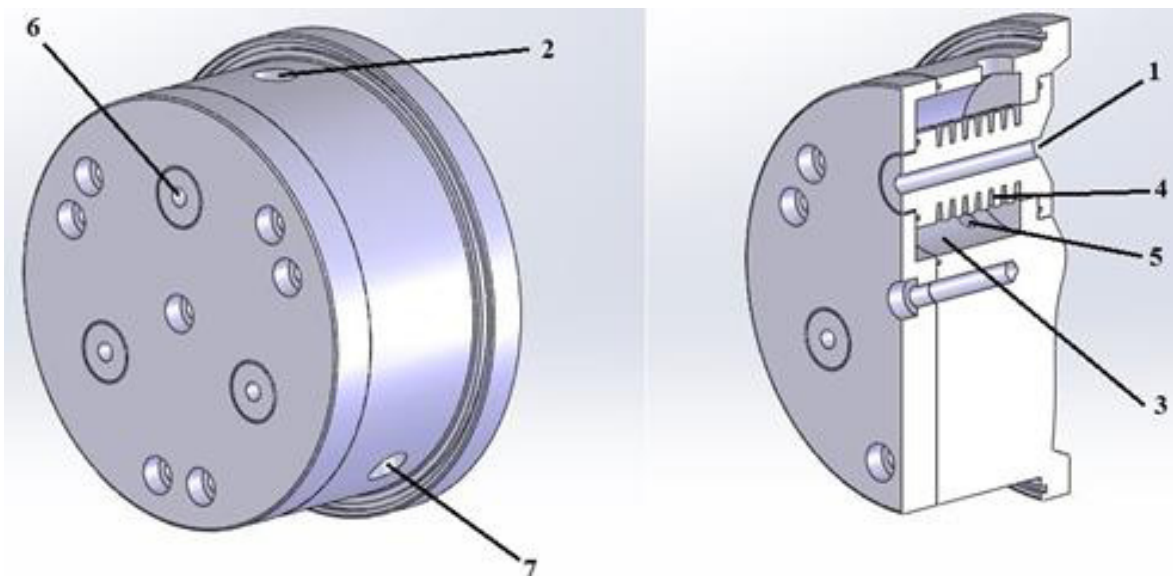


Abbildung 4.7: Baugruppe (eigene Konstruktion)

Nachdem das zu verarbeitende Material im Extruder aufgeschmolzen und homogenisiert wurde tritt die Schmelze in die Düsenöffnung (1) ein. Während dieses Vorganges tritt Kühlwasser durch die Öffnung (2) in die Düsenplatte ein. Dieses strömt in die Kühlwasserkammer (3) und umfließt somit die Kühlrippen (4) des Düseneinsatzes. Nachdem das Wasser die erste Kammer durchströmt hat dringt es durch die Bohrungen (5) in die weiteren Kühlwasserkammern ein.

Letztendlich verlässt das Kühlwasser das System durch die Austrittsöffnungen (7). Nachdem die Schmelze beim Durchfließen der Düse Wärmeenergie verloren hat wird sie beim Austreten aus der Düse (6) durch ein zentrisch gelagertes rotierendes Messer abgetrennt.

#### 4.3.5 Berechnungen zur Kühlung

Im Folgenden werden Berechnungen zur Kühlung innerhalb der Düse angestellt. Als Kunststoff wird Polyethylen vom Typ Liten (Datenblatt: Anlage A-I) angenommen. Roggenkleie wurde als Füllmaterial gewählt. Da das Ziel eine Füllung mit bis zu achtzig Prozent Naturstoff ist wurde auch mit diesem Füllstoffgehalt gerechnet. Die Werte werden statisch berechnet, das heißt die zeitliche Änderung der Temperatur wird nicht berücksichtigt. Die Quellen der verwendeten Werte und Variablen werden hinter diesen angegeben.

<u>Beschreibung</u>	<u>Formel</u>	<u>Quelle</u>
<b>Temperatur</b>	$\theta_{\text{Wasser}}=20^{\circ}\text{C}$	Annahme
	$\theta_{\text{Schmelze}}=180^{\circ}\text{C}$	
	$\theta_{\text{Düse}}=80^{\circ}\text{C}$	
<b>Strangdurchmesser</b>	$d_{\text{Strang}}=4\text{mm}$	=Düsenbohrungsdurchmesser
<b>Massestrom Schmelze</b>	$\dot{m} = 20 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 0,0056 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$	Annahme
<b>Spezifische Wärmekapazität</b>	$c_{\text{Polyethylen}} = 2,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	[13]
	$c_{\text{Roggenkleie}} = 1,95 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	[14]
<b>Düsenlänge</b>	$l_{\text{Düse}}=30\text{mm}$	aus Zeichnung übernommen
<b>Wärmeleitfähigkeit Düse</b>	$\lambda_{\text{Cortal}}=135 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$	[17]

<u>Beschreibung</u>	<u>Formel</u>	<u>Quelle</u>
<b>Radien</b>	$r_{\text{Düse ohne Kühlrippen}} = 6\text{mm}$	aus Zeichnung übernommen
	$r_{\text{Strang}} = 2\text{mm}$	
<b>Strömungsgeschwindigkeit Kühlwasser</b>	$v_{\text{Kühlwasser}} = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	Schätzung nach Strömungsanalyse im CAD-Programm
<b>Oberfläche Kühlkörper</b>	$A_{\text{Kühlkörper}} = 0,005098\text{m}^2$	aus Zeichnung übernommen

Tabelle 4.0: Verwendete Werte (eigene Konstruktion)

### Vorhandene Wärmeenergie

Zunächst wird die Wärmeenergie  $Q_{\text{Schmelze}}$  der Schmelze berechnet. Dies ist nötig um zu wissen, was abgeführt werden muss. Betrachtet wird hier die anfallende Wärmeenergie bei  $t=1\text{s}$ .

$$Q_{\text{Schmelze}} = \frac{\dot{m}}{t} \cdot (0,2 \cdot c_{\text{Polyethylen}} + 0,8 \cdot c_{\text{Roggenkleie}}) \cdot (\theta_{\text{Schmelze}} - 0^\circ\text{C})$$

$$Q_{\text{Schmelze}} = \frac{0,0056 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{1\text{s}} \cdot \left( 0,2 \cdot 2,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} + 0,8 \cdot 1,95 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right) \cdot (180^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}) = 2,04\text{kJ}$$

Gleichung 4.0: Wärmeenergie der Schmelze (eigene Konstruktion) [15]

Dies bedeutet das 2,04kJ pro Sekunde abgeführt werden müssen um die Schmelze auf  $0^\circ\text{C}$  abzukühlen.

### Abführbare Wärmeenergie durch Wärmeleitung

Zunächst wird die Wärmeenergie des Stranges über die umgebende Düse durch Wärmeleitung abgeführt. Hierbei wird wieder die abführbare Wärmeenergie bei  $t=1\text{s}$  berechnet.

$$Q_{\text{Wärmeleitung}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot l_{\text{Düse}} \cdot \lambda_{\text{Cortal}} \cdot (\theta_{\text{Schmelze}} - \theta_{\text{Düse}})}{\ln \frac{r_{\text{Düse ohne Kühlrippen}}}{r_{\text{Strang}}}} \cdot t$$

$$Q_{\text{Wärmeleitung}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 30\text{mm} \cdot 135 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \cdot (180^\circ\text{C} - 80^\circ\text{C})}{\ln \frac{6\text{mm}}{2\text{mm}}} \cdot 1\text{s} = 2,32\text{kJ}$$

**Gleichung 4.1: Wärmeleitung Düse (eigene Konstruktion) [16]**

Somit kann durch den Düseneinsatz 2,32kJ pro Sekunde abgeführt werden.

### Abführbare Wärmeenergie durch den Kühlkörper

Nachdem die Wärme vom Strang über die zylindrische Düse geleitet wurde wird sie nun über die Kühlrippen an das umströmende Kühlwasser abgegeben. Hierzu wird die durch die Kühlrippen abführbare Wärmeenergie berechnet. Der verwendete Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  wird über die Näherungsformel für Wasser nach [18] berechnet.

$$\alpha = 2100 \cdot \sqrt{v} + 580$$

$$\alpha = 2100 \cdot \sqrt{1 \frac{\text{m}}{\text{s}}} + 580 = 2680$$

**Gleichung 4.2: Wärmeübergangskoeffizient (eigene Konstruktion) [18]**

Mit dem berechneten Wärmeübergangskoeffizient kann nun die durch die Kühlrippen abgebbare Wärmeenergie berechnet werden.

$$Q_{\text{Kühlrippen}} = \alpha \cdot A_{\text{Kühlkörper}} \cdot (\theta_{\text{Düse}} - \theta_{\text{Wasser}}) \cdot t$$

$$Q_{\text{Kühlrippen}} = 2680 \cdot 0,005098\text{m}^2 \cdot (80^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) \cdot 1\text{s} = 0,82\text{kJ}$$

**Gleichung 4.3: Wärmeübertragung Kühlkörper (eigene Konstruktion) [19]**

Dies bedeutet, dass die durch das Kühlwasser von den Kühlrippen abführbare Wärmeenergie von 0,82kJ der begrenzende Faktor bei der Kühlung ist, da es sich hierbei um den geringsten Wert handelt.

### Strangtemperatur nach dem Austritt aus der Düse

Die Temperatur des Stranges nach dem Austritt aus der Düse lässt sich über eine Verhältnisgleichung berechnen.

$$\theta_{Strangabgekühlt} = \frac{\theta_{Schmelze} \cdot (Q_{Schmelze} - Q_{Kühlrippen})}{Q_{Schmelze}}$$
$$\theta_{Strangabgekühlt} = \frac{180^{\circ}\text{C} \cdot (2,04\text{kJ} - 0,82\text{kJ})}{2,04\text{kJ}} = 107,65^{\circ}\text{C}$$

**Gleichung 4.4: Strangtemperatur nach Düse (eigene Konstruktion)**

Somit wurde durch die passive Wasserkühlung in der Düse ein großer Teil der Wärmeenergie abgeführt und die Erweichungstemperatur [20] von 122°C unterschritten. Damit sollte sich das Granulat nach dem Abtrennprozess ohne Mehrkornbildung bis zur Abfüllung transportieren lassen. Durch die niedrige Temperatur des Granulates muss jedoch darauf geachtet werden, dass das Material nicht schon in der Düse erstarrt und diese verstopft.

## 4.4 Beschreibung der überarbeiteten Konstruktion

In den kommenden Abschnitten wird die durch einen Konstrukteur überarbeitete Konstruktion vorgestellt. Die Überarbeitung erfolgte, um die langjährige Erfahrung des Konstrukteurs mit einzubringen und fertigungstechnische Problemstellen zu beseitigen. Danach folgt eine Erläuterung der Funktionsweise der Baugruppe. Abschließend werden Berechnungen zu der Kühlung durchgeführt.

### 4.4.1 Düsenplatte

Abbildungen 4.8 bis 4.10 zeigen die überarbeitete Düsenplatte. Abbildung 4.8 zeigt das ungeschnittene Bauteil. In Abbildung 4.9 wird ein Schnitt im Radius gezeigt, Abbildung 4.10 stellt einen Schnitt auf Höhe der Kanäle dar. Die Düsenplatte wird aus dem nitrierten Werkstoff X153CrMoV12 (Werkstoff-Nummer: 1.2379) gefertigt.

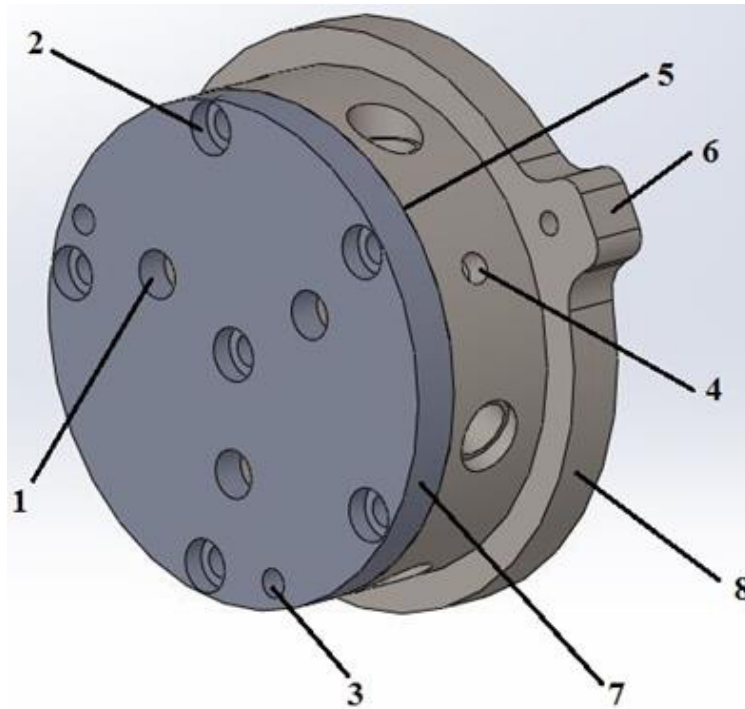


Abbildung 4.8: Düsenplatte, Ansicht 1 (überarbeitete Konstruktion)

Die überarbeitete Düsenplatte aus Abbildung 4.8 besteht wie schon die eigene Konstruktion aus fertigungstechnischen Gründen aus zwei Teilen (7) und (8), welche dichtend zusammengefügt werden (5). Durch die Bohrungen (2) werden die beiden Teile mit Schrauben verbunden. Die drei Öffnungen (1) werden in der Baugruppe von den Düseneinsätzen ausgefüllt. Öffnung (4) ist für einen Temperaturfühler vorgesehen. Somit kann die Temperatur möglichst nah an der Düse bestimmt werden. Die Auswölbung (6) dient zur Lagefixierung der Düsenplatte.

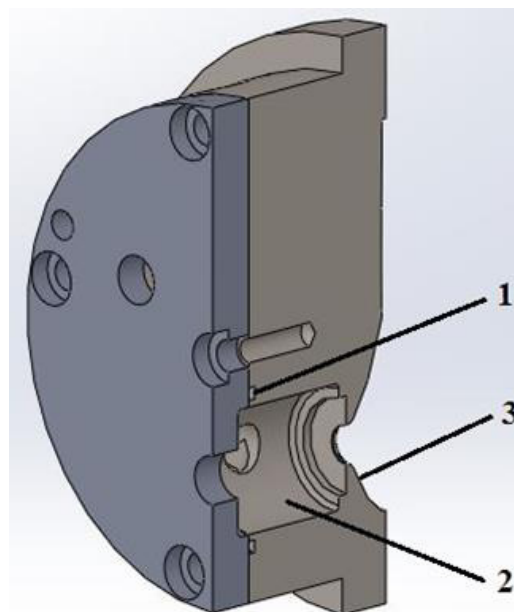


Abbildung 4.9: Düsenplatte, Ansicht 2 (überarbeitete Konstruktion)

Die Einzelteile der überarbeiteten Düsenplatte (Abbildung 4.9) werden durch O-Ringe (1) abgedichtet. Die passive Kühlung durch Wärmeleitung und Konvektion wird wiederum durch die mit Kühlwasser durchströmten Kammern (2) realisiert. Um eine zu lange Verweilzeit durch eine zu geringe Umfangsgeschwindigkeit in der Mitte der Plastifizierschnecke zu vermeiden wurde der Abstand zwischen Schneckenende und Düsenplatte so gering wie möglich gehalten. Die Vertiefungen (3) dienen dabei zur Verbesserung der Fließbedingungen der Schmelze an der Düsenöffnung.

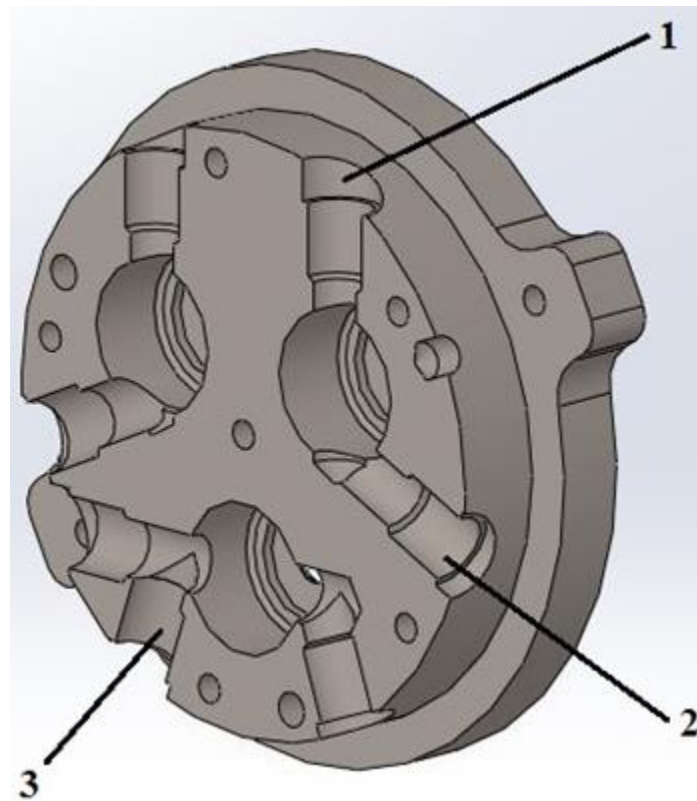


Abbildung 4.10: Düsenplatte, Ansicht 3 (überarbeitete Konstruktion)

In Abbildung 4.10 ist die überarbeitete Düsenplatte auf Höhe der Kanäle geschnitten. Die im vorherigen Abschnitt beschriebenen Kammern (Abbildung 4.9, (2)) werden durch Öffnungen (1) mit Wasser befüllt. Dieses strömt mit  $6 \frac{l}{min}$  (durch die in der Firma verwendeten Wasserverteiler begrenzt) in die Kammer und trifft mittig auf den Düseneinsatz. Statt wie bei der eigenen Konstruktion wird hier jede Kammer einzeln mit Wasser angesteuert, was eine gleiche Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit in jeder Kammer verspricht. Nachdem die Düseneinsätze umströmt wurden verlässt das Kühlwasser die Kammer über die Öffnung (2). Somit werden sechs Wasseranschlüsse benötigt, drei Zulaufe und drei Abläufe. Ziffer (3) bezieht sich auf den Zulauf der unteren Düse.

#### 4.4.2 Düseneinsatz

In den Abbildungen 4.11 bis 4.13 ist der überarbeitete Düseneinsatz dargestellt. Abbildung 4.11 stellt das ungeschnittene Bauteil dar, in Abbildung 4.12 wurde im Radius geschnitten. Das ungeschnittene Bauteil in der Rückansicht ist in Abbildung 4.13 dargestellt. Die Düseneinsätze sind aus der hochfesten Aluminiumlegierung CERTAL gefertigt (AlZn5Mg3Cu). Somit ist wieder eine für einen Aluminiumwerkstoff hohe Härte und Festigkeit bei gleichzeitig guter Wärmeleitfähigkeit erreicht.

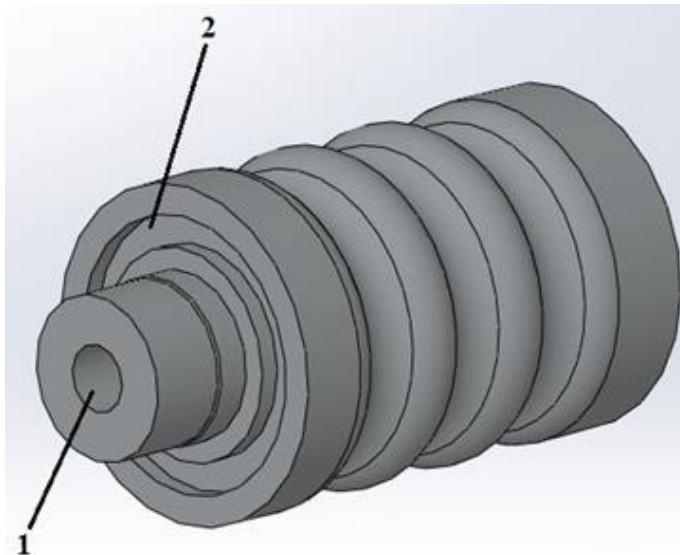


Abbildung 4.11: Düseneinsatz, Ansicht 1 (überarbeitete Konstruktion)

Der überarbeitete Düseneinsatz (Abbildung 4.11) wird in die Öffnungen (Abbildung 4.8, (1)) der überarbeiteten Düsenplatte eingesetzt. Durch die Bohrung mit dem Durchmesser 4mm (1) wird das NPC-Material geleitet. Die Nut (2) dient für einen O-Dichtungsring. Dieser realisiert die Abdichtung zwischen Düsenplatte und Düseneinsatz um ein Austreten des Kühlwassers oder ein Eintreten der Schmelze in die Kühlwasserkammern zu verhindern.

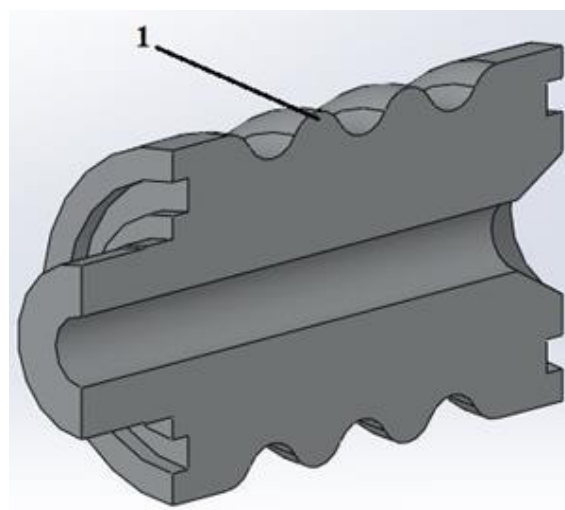


Abbildung 4.12: Düseneinsatz, Ansicht 2 (überarbeitete Konstruktion)



In Abbildung 4.12 ist der Düseneinsatz im Radius geschnitten. Wie schon bei der eigenen Konstruktion ist der Düseneinsatz wieder wie ein Kühlkörper gestaltet. Die Kühlrippen (1) wurden aus fertigungstechnischen Gründen jedoch vereinfacht. Dadurch besteht zwar eine größere Oberfläche als ohne Kühlrippen, jedoch ist der Effekt des Kühlkörpers geringer als bei der eigenen Konstruktion.

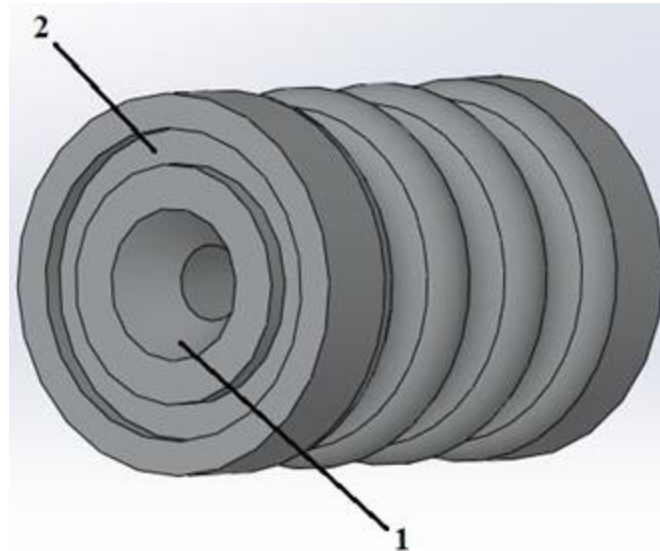


Abbildung 4.13: Düseneinsatz, Ansicht 3 (überarbeitete Konstruktion)

Der zum Düseneinlass zulaufende Konus (1) in Abbildung 4.13 wurde im Vergleich zur eigenen Konstruktion verkleinert, jedoch wurde die Düsenplatte so überarbeitet, dass sich insgesamt bessere Fließeigenschaften ergeben. Somit wird die Gefahr des Anstauens der Naturstoff-Fasern verringert. Die Nut (2) dient zur Abdichtung durch einen O-Ring.

#### 4.4.3 Funktionsweise

Die Funktionsweise der überarbeiteten Konstruktion unterscheidet sich kaum von der der eigenen Konstruktion. Der einzige Unterschied besteht darin, dass die Kühlwasserkammern einzeln mit Wasser angesteuert werden, statt über nur einen Wasserzulauf.

#### 4.4.4 Berechnungen zur Kühlung

Im Folgenden werden Berechnungen zur Kühlung innerhalb der überarbeiteten Düse angestellt. Als Kunststoff wird wieder Polyethylen vom Typ Liten [20] angenommen, gefüllt mit Roggenkleie. Da das Ziel eine Füllung mit bis zu achtzig Prozent Naturstoff ist, wurde auch hier wieder mit diesem Füllstoffgehalt gerechnet. Die Werte werden statisch berechnet, das heißt die zeitliche Änderung der Temperatur wird nicht berücksichtigt. Die Quellen der verwendeten Werte und Variablen werden hinter diesen angegeben.

<u>Beschreibung</u>	<u>Formel</u>	<u>Quelle</u>
<b>Temperatur</b>	$\theta_{\text{Wasser}}=20^{\circ}\text{C}$	Annahme
	$\theta_{\text{Schmelze}}=180^{\circ}\text{C}$	
	$\theta_{\text{Düse}}=80^{\circ}\text{C}$	
<b>Strangdurchmesser</b>	$d_{\text{Strang}}=4\text{mm}$	=Düsenbohrungsdurchmesser
<b>Massestrom Schmelze</b>	$\dot{m} = 20 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 0,0056 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$	Annahme
<b>Spezifische Wärmekapazität</b>	$c_{\text{Polyethylen}} = 2,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	[13]
	$c_{\text{Roggenkleie}} = 1,95 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	[14]
<b>Düsenlänge</b>	$l_{\text{Düse}}=30\text{mm}$	aus Zeichnung übernommen
<b>Wärmeleitfähigkeit Düse</b>	$\lambda_{\text{Cortal}}=135 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$	[17]
<b>Radien</b>	$r_{\text{Düse ohne Kühlrippen}} = 8,2\text{mm}$	aus Zeichnung übernommen
	$r_{\text{Strang}} = 2\text{mm}$	
<b>Strömungsgeschwindigkeit Kühlwasser</b>	$v_{\text{Kühlwasser}} = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	Schätzung nach Strömungsanalyse im CAD-Programm
<b>Oberfläche Kühlkörper</b>	$A_{\text{Kühlkörper}}=0,002791\text{m}^2$	aus Zeichnung übernommen

Tabelle 4.1: Verwendete Werte (überarbeitete Konstruktion)

### Vorhandene Wärmeenergie

Zunächst wird wieder die Wärmeenergie  $Q_{\text{Schmelze}}$  der Schmelze berechnet. Dies ist nötig um zu wissen, was abgeführt werden muss. Betrachtet wird hier die anfallende Wärmeenergie bei  $t=1\text{s}$ .

$$Q_{Schmelze} = \frac{\dot{m}}{t} \cdot (0,2 \cdot c_{Polyethylen} + 0,8 \cdot c_{Roggenkleie}) \cdot (\theta_{Schmelze} - 0^\circ\text{C})$$

$$Q_{Schmelze} = \frac{0,0056 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{1\text{s}} \cdot \left( 0,2 \cdot 2,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} + 0,8 \cdot 1,95 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right) \cdot (180^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}) = 2,04\text{kJ}$$

**Gleichung 4.5: Wärmeenergie der Schmelze (überarbeitete Konstruktion) [15]**

Dies bedeutet das 2,04kJ pro Sekunde abgeführt werden müssen um die Schmelze auf 0°C abzukühlen.

### **Abführbare Wärmeenergie durch Wärmeleitung**

Zunächst wird die Wärmeenergie des Stranges über die umgebende Düse durch Wärmeleitung abgeführt. Hierbei wird wieder die abführbare Wärmeenergie bei t=1s berechnet.

$$Q_{Wärmeleitung} = \frac{2 \cdot \pi \cdot l_{Düse} \cdot \lambda_{Cortal} \cdot (\theta_{Schmelze} - \theta_{Düse})}{\ln \frac{r_{DüseohneKühlrippen}}{r_{Strang}}} \cdot t$$

$$Q_{Wärmeleitung} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 30\text{mm} \cdot 135 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \cdot (180^\circ\text{C} - 80^\circ\text{C})}{\ln \frac{8,2\text{mm}}{2\text{mm}}} \cdot 1\text{s} = 1,80\text{kJ}$$

**Gleichung 4.6: Wärmeleitung Düse (überarbeitete Konstruktion) [16]**

Somit kann durch den überarbeiteten Düseneinsatz 1,80kJ pro Sekunde abgeführt werden.

### **Abführbare Wärmeenergie durch den Kühlkörper**

Nachdem die Wärme vom Strang über die zylindrische Düse geleitet wurde wird sie nun über die Kühlrippen an das umströmende Kühlwasser abgegeben. Hierzu wird die durch die Kühlrippen abführbare Wärmeenergie berechnet. Der verwendete Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  wird über die Näherungsformel für Wasser nach [18] berechnet.

$$\alpha = 2100 \cdot \sqrt{v} + 580$$

$$\alpha = 2100 \cdot \sqrt{1 \frac{\text{m}}{\text{s}}} + 580 = 2680$$

**Gleichung 4.7: Wärmeübergangskoeffizient (überarbeitete Konstruktion) [18]**

Mit dem berechneten Wärmeübergangskoeffizient kann nun die durch die Kühlrippen abgebbare Wärmeenergie berechnet werden.

$$Q_{Kühlrippen} = \alpha \cdot A_{Kühlkörper} \cdot (\theta_{Düse} - \theta_{Wasser}) \cdot t$$

$$Q_{Kühlrippen} = 2680 \cdot 0,002791 m^2 \cdot (80^\circ C - 20^\circ C) \cdot 1s = 0,45 kJ$$

**Gleichung 4.8: Wärmeübertragung Kühlkörper (überarbeitete Konstruktion) [19]**

Dies bedeutet, dass die durch das Kühlwasser abführbare Wärmeenergie von 0,45kJ der Kühlrippen der begrenzende Faktor bei der Kühlung ist.

### **Strangtemperatur nach dem Austritt aus der Düse**

Die Temperatur des Stranges nach dem Austritt aus der Düse lässt sich über eine Verhältnisgleichung berechnen.

$$\theta_{Strangabgekühlt} = \frac{\theta_{Schmelze} \cdot (Q_{Schmelze} - Q_{Kühlrippen})}{Q_{Schmelze}}$$

$$\theta_{Strangabgekühlt} = \frac{180^\circ C \cdot (2,04 kJ - 0,45 kJ)}{2,04 kJ} = 140,29^\circ C$$

**Gleichung 4.9: Strangtemperatur nach Düse (überarbeitete Konstruktion)**

Durch die geringere Oberfläche der überarbeiteten Düse wird nicht wie bei der ersten Version annähernd die Erweichungstemperatur erreicht. Somit sind bei Düsenaustritt 140,29°C Strangtemperatur erreicht. Wenn es im weiteren Verlauf zu einer Mehrkornbildung kommt muss noch eine weitere Kühlmaßnahme angeschlossen werden. Sollte das Problem der Mehrkornbildung jedoch nicht auftreten ist keine weitere Kühlung notwendig und das Granulat kann direkt abgefüllt werden. Eine weitere Lösung wäre die Reduzierung des Massestroms der Schmelze. Geht man zum Beispiel von  $15 \frac{kg}{h}$  aus würde der Strang nach Düsenaustritt eine Temperatur von circa 127°C besitzen. Zudem wäre es möglich, einen Düseneinsatz mit einer größeren Kühlrippenoberfläche zu verwenden. Hier muss jedoch darauf geachtet werden, dass die Geometrie nicht zu komplex für eine spanende oder erodierende Fertigung wird.

## 5 Versuche

In dem folgenden Kapitel werden die durchgeführten Versuche dargestellt. Zunächst werden dazu die zu erwartenden Granulattemperaturen berechnet. Anschließend werden die durchgeführten Versuche beschrieben und mit den Erwartungen verglichen. Abschließend werden die Ergebnisse und die Einflüsse der einzelnen Parameter ausgewertet.

### 5.1 Zielstellung

Die Versuche wurden mit der neuen Granuliereinheit (Abbildung 5.0) durchgeführt. Es wurden ein Düseneinsatz und zwei Blindstopfen verwendet, damit nur ein kleiner Unterschied zu der alten Konstruktion besteht und die Granulierung somit besser erprobt werden kann. Durch kurzfristig aufgetretene Probleme mit der Dosiereinheit konnte nur eine begrenzte Anzahl Versuche durchgeführt werden.

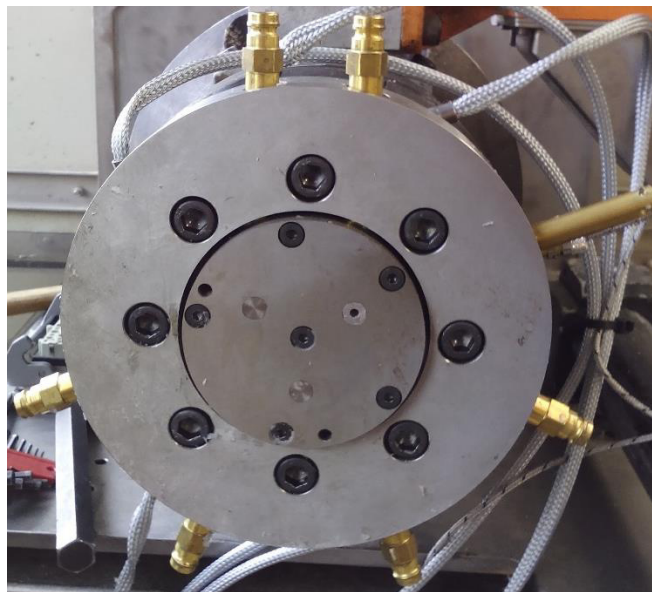


Abbildung 5.0: Granuliereinheit

Durch die Versuche sollte zunächst die Funktionalität der neuen Konstruktion erprobt werden. Anschließend wurden einige Vorversuche durchgeführt, um erste Annahmen über den Einfluss einiger Parameter zu treffen.

Die Extrudertemperatur wurde auf 175°C eingestellt, um ein vollständiges Aufschmelzen des Kunststoffes zu garantieren, und konstant gehalten. Ebenso wurde der Volumenstrom des Kühlwassers auf  $1 \frac{l}{min}$  geregelt, was der niedrigste einstellbare Wert ist. Somit soll der Kühleffekt zunächst auf niedrigster Stufe beobachtet werden. Als Parameter wurde der Füllstoffgehalt des Naturstoffs variiert, um den Einfluss der unterschiedlichen spezifischen

Wärmekapazität zu ermitteln. Zudem wurden die Drehzahlen des Extruders und der Dosierschnecke verändert, was den Einfluss einer veränderten Schmelztemperatur und eines veränderten Massestroms darstellen soll. Somit wurden sechs Versuche durchgeführt. Als Naturstoff wurde Roggenkleie verwendet, da sich diese bei Vorversuchen im Betrieb problemlos verarbeiten ließ. Da für den Kunststoff PE HD Liten MB62 die zur Berechnung benötigten Werte vorhanden waren, wurde dieser als Kunststoff gewählt. Das Datenblatt des Kunststoffs findet sich im Anhang A-I. Durch vorherige Versuche der Firma Ökoplast Mittweida GmbH waren die benötigten Compounds als homogen vermishtes Mahlgut vorhanden, welches für die durchgeführten Versuche verwendet wurde. Somit sollte eine problemlose Extrusion garantiert werden.

Versuch	Naturstoffgehalt [%]	$n_{\text{Förderschnecke}} [\text{min}^{-1}]$	$n_{\text{Extruder}} [\text{min}^{-1}]$
1	0	5	94
2		8	226
3	20	5	94
4		8	226
5	50	5	94
6		8	226

Tabelle 5.0: Versuchsplan

## 5.2 Erwartungen

Durch das Bestimmen des Gewichtes einzelner Proben konnte der Massestrom der Schmelze bestimmt werden. Dazu wurde der Extruder inklusive Granuliereinheit ohne angeschlossene Kühlung betrieben, um einen Schmelzestrang zu produzieren. Hierbei wurden jeweils fünf Proben nach einer definierten Zeit entnommen und gewogen. Der Massestrom stellt den Mittelwert der Massen der Proben dar. Die ungefähre Temperatur der Schmelze wurde durch ein Thermoelement in der Düsenplatte in der Nähe der Düse bestimmt. Dies ist jedoch nur eine ungefähre Bestimmung der Schmelztemperatur, da der Temperatursensor in der Düsenplatte sitzt und keinen direkten Kontakt zur Schmelze hat.

Versuch	$\dot{m} \left[ \frac{kg}{h} \right]$	$\theta_{Schmelze} [^{\circ}C]$
1	8,08	186
2	12,66	191
3	5,89	183
4	9,77	187
5	5,04	182
6	8,07	184

Tabelle 5.1: Zielgrößen

Anhand dieser Zielgrößen können nun mit Hilfe der Gleichungen aus Kapitel 4 die zu erwartenden Granulattemperaturen berechnet werden. Bis auf die vier veränderten Größen Massestrom, Schmelztemperatur, Strömungsgeschwindigkeit und Naturstoffgehalt werden die verwendeten Werte aus Tabelle 4.1 zur Berechnung verwendet. Die Strömungsgeschwindigkeit des Kühlwassers wird wie in Kapitel 4 durch die Strömungsanalyse des CAD-Programms auf  $0,17 \frac{m}{s}$  geschätzt. Die restlichen veränderten Größen wurden aus den Tabellen 5.0 und 5.1 entnommen.

Versuch	$\theta_{GranulatErwartet} [^{\circ}C]$
1	139,50
2	161,43
3	117,45
4	147,28
5	101,11
6	133,82

Tabelle 5.2: Erwartete Granulattemperaturen

Bei den Versuchen mit den höheren Drehzahlen ist auch die Granulattemperatur höher. Dies resultiert aus der höheren eingebrachten Scherenergie, welche die Wärmeenergie der Schmelze steigert. Bei den Versuchen mit den kleineren Drehzahlen ist die Granulattemperatur niedriger als die Schmelztemperatur des Kunststoffes von circa  $140^{\circ}C$ . Die Temperaturen nehmen bei gleichen Drehzahlen mit zunehmenden Füllstoffgehalt ab. Dies ist auf die kleinere spezifische Wärmekapazität zurückzuführen.

### 5.3 Versuchsdurchführung

Um die realen Granulattemperaturen zu ermitteln wurden nun die Versuche nach Tabelle 5.0 durchgeführt. Hierbei wurde der Versuchsstand zunächst auf 175°C aufgeheizt. Anschließend wurde er mit niedriger Extruder- und Förderschneckendrehzahl betrieben bis sich eine konstante Temperatur am Thermoelement in der Düsenplatte eingestellt hat. Nun wurde mit den geplanten Versuchen begonnen, zunächst ohne zugeschaltete Kühlung. Es wurde der Massestrom ermittelt, indem die Strangproben einer bestimmten Zeitperiode gewogen wurden. Zudem wurde die Temperatur der Düsenplatte als Strangtemperatur notiert. Anschließend wurde die Kühlung mit dem kleinstmöglichen Volumenstrom von  $1 \frac{l}{min}$  zugeschaltet. Dies führte zu einem Erstarren der Schmelze innerhalb der Düse, worauf diese verstopfte. Daraufhin wurde sofort die Temperatur des erstarrten Strangs innerhalb der Düse durch ein Handthermometer bestimmt. Diese gemessene Temperatur wurde als Granulattemperatur angenommen. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass dies nur als Näherung zu verstehen ist. Zudem wurde die Temperatur des Düseneinsatzes mit einem Handthermometer bestimmt. Somit ergaben sich die in Tabelle 5.3 dargestellten realen Granulattemperaturen.

Versuch	$\theta_{Düse} [^{\circ}C]$	$\theta_{GranulatGemessen} [^{\circ}C]$
1	48	124
2	52	139
3	46	107
4	50	135
5	46	97
6	49	118

Tabelle 5.3: gemessene Granulattemperaturen

Die gemessenen Granulattemperaturen verhalten sich ähnlich den berechneten Temperaturen. Hier ist jedoch auffällig, dass alle Temperaturen unterhalb der ungefähren Schmelztemperatur des Polyethylens von 140°C liegen.

Bei allen Versuchen bewirkte die Wasserkühlung ein Erstarren der Schmelze innerhalb der Düse. Dies führte zum Verstopfen der Düsenbohrung und somit zu einem Rückstau der Schmelze bis zu dem Einzug des Extruders. Dadurch war ein Fortführen des Versuchs nicht möglich. Aufgrund dessen musste die Funktionalität des Granuliermessers an der ungekühlten Schmelze getestet werden, wodurch es bei dem abgetrennten Material zu einer Mehrkornbildung kam. Dies ist beispielsweise an zwei Proben in Abbildung 5.1 dargestellt.



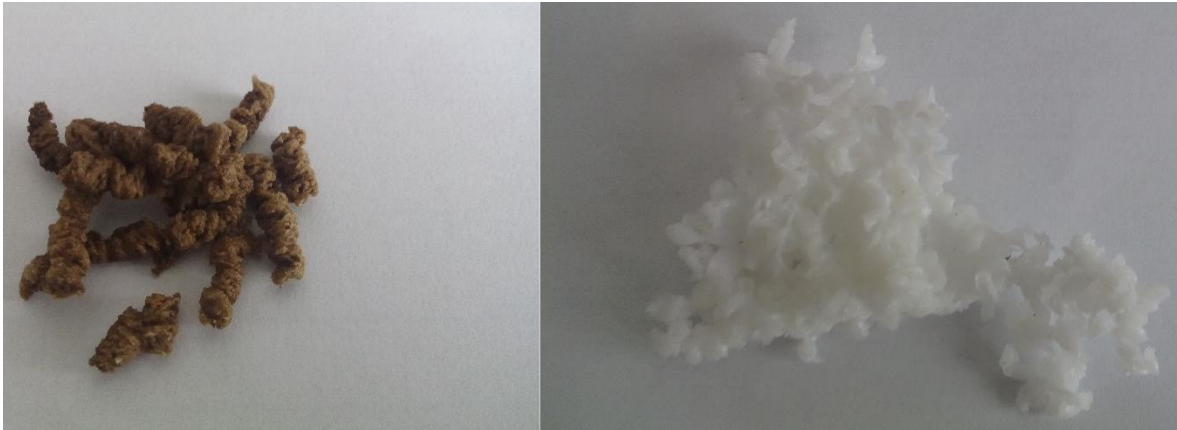


Abbildung 5.1: Granulat

Die linke Abbildung zeigt ein NPC mit 50% Roggenkleie, das rechte Bild zeigt den ungefüllten Kunststoff.

Trotz der noch flüssigen Schmelze trennte das Granuliertmesser den Strang ohne ein Verschmieren ab.

#### **5.4 Vergleich zwischen den berechneten und gemessenen Granulattemperaturen**

Die in Tabelle 5.2 berechneten Granulattemperaturen geben die Rechnungen mit den Annahmen aus Tabelle 4.1 wieder. Die durchgeführten Messungen ließen durch ihre Ergebnisse jedoch vermuten, dass sich außer den veränderten Werten auch andere Größen von den Annahmen unterscheiden. So gibt das vorhandene Kühlwasseraggregat eine Kühlwassertemperatur von 21°C vor. Zudem schwankte die Temperatur der Düse je Versuch zwischen 46°C und 52°C und unterschied sich somit von den angenommenen 80°C. Weitere Abweichungen können durch die statische Betrachtung bei der Berechnung zustande kommen, da sich in der Praxis die Temperaturdifferenzen kontinuierlich verändern.

In Abbildung 5.2 ist der Unterschied zwischen den berechneten und den gemessenen Granulattemperaturen in einem Diagramm dargestellt, die Werte wurden aus den Tabellen 5.2 und 5.3 entnommen.

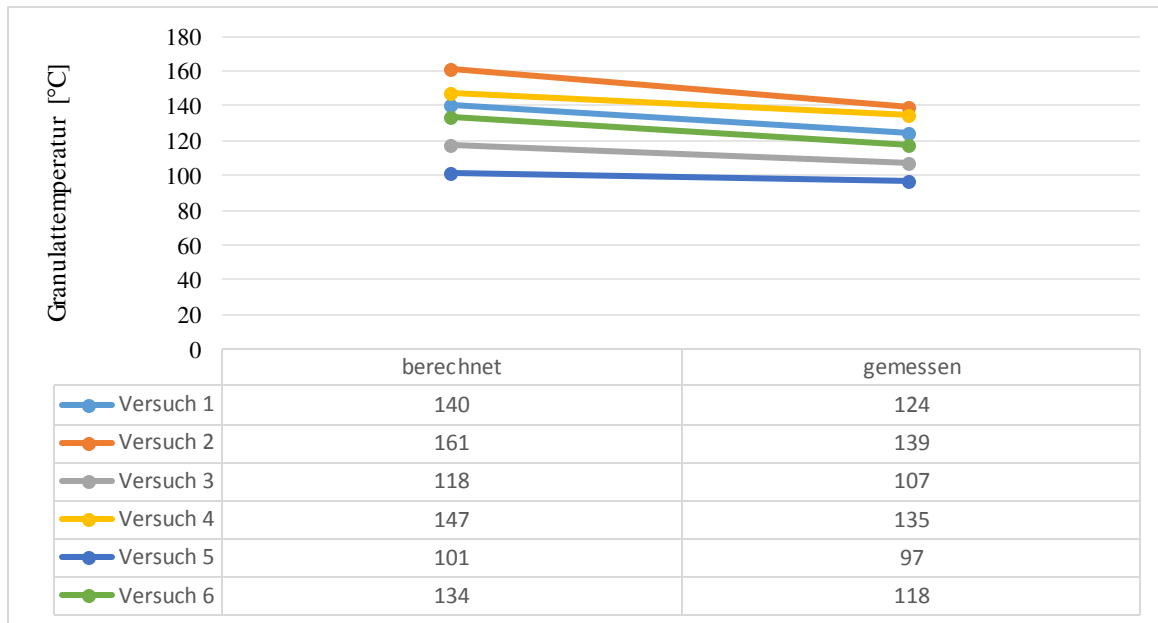


Abbildung 5.2: Vergleich der Granulattemperaturen

Bei den Versuchen mit 0% Naturstoff ergaben sich die höchsten Granulattemperaturen. Diese nehmen mit zunehmenden Naturstoffgehalt ab. Die größten Temperaturunterschiede ergeben sich im Durchschnitt bei reinem Kunststoff, die geringsten Unterschiede bestehen bei 50% Naturstoffgehalt.

## 5.5 Auswertung der Versuche

Die Versuche geben zunächst Aufschluss darüber, dass der Strang innerhalb der Düse die Schmelztemperatur von circa 140°C nicht unterschreiten darf, da er sonst erstarrt. Durch die theoretischen Berechnungen und die angestellten Versuche lassen sich auch erste Annahmen über die Auswirkungen der Änderung einiger Parameter treffen.

Mit steigendem Naturstoffgehalt sinkt die Granulattemperatur. Zudem werden die Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Werten kleiner.

Die Erhöhung des Naturstoffgehalts senkt die spezifische Wärmekapazität des Compounds. Dies begründet sich durch die niedrigere spezifische Wärmekapazität der Roggenkleie. Dadurch sinkt die Menge der abzuführenden Wärmeenergie der Schmelze pro Zeiteinheit, da die spezifische Wärmekapazität in diese Formel als Faktor eingeht (siehe Gleichung 4.5). Somit sinkt auch die Granulattemperatur. Dadurch sinkt zudem die Wärmeleitfähigkeit des Compounds. Somit ließen sich die Unterschiede der Granulattemperaturen zwischen Theorie und Praxis erklären. Bei reinem Kunststoff ist die Wärmeleitfähigkeit somit am größten. Dadurch kann die Wärmeenergie der Schmelze besser an die Umgebung abgegeben werden. So könnten die größten Unterschiede zwischen berechneten und gemessenen Werten zustande kommen, da die Wärmeleitfähigkeit bei den Berechnungen nicht berücksichtigt wird.

Durch einen höheren Massestrom der Schmelze steigt die Granulattemperatur.

Die Erhöhung des Massestroms bewirkt ein Ansteigen der abzuführenden Wärmeenergie pro Zeiteinheit, da der Massestrom in diese Formel als Faktor eingeht (siehe Gleichung 4.5). Somit steigt auch die Granulattemperatur. Zudem erhöht sich durch die höhere Wärmeenergie der Schmelze die Temperatur der Düse. Dadurch verringert sich durch die niedrigere Temperaturdifferenz die durch Wärmeleitung abführbare Wärmeenergie. Gleichzeitig steigt durch eine größere Temperaturdifferenz zwischen Kühlwasser und Düse die durch das Kühlwasser abführbare Wärmeenergie.

Durch eine höhere Schmelzetemperatur steigt die Granulattemperatur.

Die Erhöhung der Schmelzetemperatur bewirkt ein Ansteigen der abzuführenden Wärmeenergie je Zeiteinheit, da diese als Faktor in die Formel eingeht (siehe Gleichung 4.5). Dies führt zu einer höheren Granulattemperatur. Zudem erhöht sich durch die größere Temperaturdifferenz auch die durch Wärmeleitung abführbare Wärmeenergie. Dabei muss aber beachtet werden, dass sich durch eine höhere Schmelzetemperatur auch die Temperatur der Düse erhöht, was durch die wiederum kleinere Temperaturdifferenz zu einer niedrigeren Wärmeleitung führt. Durch die höhere Temperatur der Düse erhöht sich, wie schon bei einem höheren Massestrom auch die durch das Kühlwasser abführbare Wärmeenergie.



## 6 Fazit und Ausblick

In diesem Kapitel wird ein zusammenfassendes Fazit zum Inhalt dieser Bachelorarbeit im Hinblick auf die Zielstellung dargestellt. Abschließend wird ein Ausblick auf den weiteren Verlauf des Themas gegeben.

Der erste Teil der Zielstellung war es, eine Granuliereinheit ohne direkten Wasserkontakt bei der Kühlung zu entwickeln. Dafür wurde die vorhandene Düsenplatte der alten Konstruktion ersetzt. Hierfür wird nun eine neu konstruierte Düsenplatte mit integrierter, passiver Wasserkühlung verwendet. Somit wird ein Kontakt zwischen dem Kühlwasser und der Schmelze vermieden und trotzdem eine wirksame Kühlung realisiert. Bei den durchgeführten Versuchen war der Effekt der Wasserkühlung trotz des niedrigsten einstellbaren Volumenstroms zu groß. Somit erstarrte die Schmelze schon innerhalb der Düse, woraufhin diese verstopfte. Dem ließe sich entgegenwirken, wenn man beispielsweise eine Wasserbatterie mit einem kleineren einstellbaren Volumenstrom verwendet. Zudem könnte man ein Temperiergerät verwenden, um das Kühlwasser auf eine höhere Temperatur zu erhitzen. Somit wird die Temperaturdifferenz zwischen Düse und Kühlwasser verringert. Um die Wärmeenergie der Schmelze zu erhöhen könnte durch Erhöhen der Extruderdrehzahl auch mehr Scherenergie in die Schmelze eingebracht werden. Zudem kann der Versuchsstand auf eine höhere Temperatur vorgeheizt werden, wobei zu beachten ist, dass der NPC nicht thermisch geschädigt wird. Die letzten beiden Varianten sind mit dem aktuellen Versuchsstand jedoch nicht möglich. Die Dosiereinheit verstopft durch die Erwärmung und das darauf folgende Anschmelzen des Kunststoffes im Förderzylinder.

Der zweite Teil der Zielstellung bestand darin, Versuche mit der neuen Granuliereinheit durchzuführen und zu überprüfen, ob die vereinfachten Berechnungen verwendbar sind. Zu diesem Punkt waren aus Zeitgründen nur anfängliche Betrachtungen anhand von Vorversuchen möglich. Hierbei wurde festgestellt, dass sich die theoretischen Berechnungen nur bedingt auf die tatsächlichen Versuchsergebnisse beziehen lassen. Dies könnte sich im Einfluss der Wärmeleitfähigkeit begründen. Somit waren die gemessenen Granulattemperaturen niedriger als die berechneten. Um den Zusammenhang zwischen Theorie und Praxis genauer zu erforschen muss die Temperatur der Schmelze und des Düseneinsatzes genauer messbar sein. In folgenden Versuchen könnte man zudem den genauen Einfluss der Wärmeleitfähigkeit empirisch ermitteln. Dazu könnten beispielsweise der Naturstoffgehalt weiter variiert werden oder Versuche mit mehreren Naturstoffen durchgeführt werden. Zusätzlich kann in weiteren Versuchen noch der Einfluss des Druckes im Extruder auf das fertige Granulat untersucht werden. Dazu wird die Anzahl der Düseneinsätze variiert.

Der dritte Teil der Zielstellung bestand darin, die Granuliereinheit mit einem NPC mit achtzig prozentiger Naturstofffüllung in Betrieb zu nehmen. Bei Vorversuchen des Betriebs

wurde jedoch festgestellt, dass sich ein Compound mit derart hohem Naturstoffgehalt nicht problemlos auf dem vorhandenen Extruder verarbeiten lässt. Die Ursachen dessen k Somit wurden für die durchgeführten Versuche Compounds mit einem niedrigerem Naturstoffgehalt verwendet.

# Literatur

- [1] Schuler, Werner: Jahrestagung Aufbereitungstechnik: Granulieren von Thermoplasten – Systeme im Vergleich. – Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1999
- [2] Nordson BKG GmbH: Aufbau einer Unterwassergranulierung. URL: <http://www.nordson-k.com/de/bkg/loesungen/unterwasser-granulierung/allgemeines/aufbau-a-funktionsweise>, verfügbar am 07.07.2014
- [3] Spur, Günther: Handbuch Urformen. – München: Carl Hanser Verlag, 2014
- [4] Coperion GmbH: WRG Wasserringgranulierung. URL: <http://www.coperion.com/compounding-extrusion/maschinen-anlagen/granulierungen/wrg-wasserringgranulierung/>, verfügbar am 07.07.2014
- [5] Schutzrecht EP0539744 A1 (1993-05-05). Keilert, Glöckner.
- [6] New Media Publisher GmbH: Granulieranlagen für das Kunststoffrecycling – neue technische und wirtschaftliche Ansätze. URL: <http://plasticer.de/news/showartikel.php?id=6>, verfügbar am 08.07.2014
- [7] Althof, Benjamin: Plastifizieren von Bio-Compounds mit einem Kurzschnellenextruder. – Mittweida: Hochschule Mittweida, 2014
- [8] Wikimedia Foundation: Compound. URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Compound>, verfügbar am 11.07.2014
- [9] Automatik Plastics Machinery GmbH: Trockenschnitt-Stranggranuliersysteme / Trockenschnitt-Stranggranulatoren. URL: <http://maag.w-4.ch/de/automatik-pelletizing-systems/jsg-trockenschnitt-stranggranuliersystem.html>, verfügbar am 12.07.2014
- [13] Anton Schweizer: Stoffwerte – Spezifische Wärmekapazität. URL: [http://www.schweizer-fn.de/stoff/wkapazitaet/wkapazitaet\\_kunststoff-glas.php](http://www.schweizer-fn.de/stoff/wkapazitaet/wkapazitaet_kunststoff-glas.php), verfügbar am 27.07.2014
- [14] HWK Münster: Roggengranulat. URL: <http://www.knr-muenster.de/index.php?id=70>, verfügbar am 14.08.2014

- [15] Wikimedia Foundation: Formelsammlung Physik. Wärmelehre. URL:  
[http://de.wikibooks.org/wiki/Formelsammlung\\_Physik:\\_W%C3%A4rmelehre](http://de.wikibooks.org/wiki/Formelsammlung_Physik:_W%C3%A4rmelehre),  
verfügbar am 27.07.2014
- [16] TU Ilmenau: Mechanismen der Wärmeübertragung. URL:  
<http://www.maschinenbau.tu-ilmenau.de/mb/wwwtd/m2twin/images/grund.pdf>, verfügbar am 27.07.2014
- [17] Alu Point: Technisches Merkblatt Certal. URL:  
<http://www.alupoint.de/Portals/12/CERTAL.pdf>, verfügbar am 27.07.2014
- [18] Wikimedia Foundation: Wärmeübergangskoeffizient. URL:  
<http://de.wikipedia.org/wiki/W%C3%A4rme%C3%BCbergangskoeffizient>,  
verfügbar am 27.07.2014
- [19] Wikimedia Foundation: Kühlrippe. URL:  
<http://de.wikipedia.org/wiki/K%C3%BChlrippe>, verfügbar am 27.07.2014



# Anlagen

Anlage 1: Herstellerdatenblätter.....	A-I
---------------------------------------	-----

# Anlage 1: Herstellerdatenblätter

## Unipetrol PE HD LITEN® MB/ML 62 HDPE

12.8.2014

Unipetrol PE HD LITEN® MB/ML 62 HDPE



Advertise with MatWeb!  
Data sheets for over 100,000 metals, plastics, ceramics, and composites.

REGISTER NOW

HOME • SEARCH • TOOLS • SUPPLIERS • FOLDERS • ABOUT US • FAQ • LOG IN

Searches: [Advanced](#) | [Category](#) | [Property](#) | [Metals](#) | [Trade Name](#) | [Manufacturer](#) | [Recently Viewed Materials](#)

 [SEARCH](#)


Custom formulated adhesives  
Over 3,000 grades available

Unipetrol PE HD LITEN® MB/ML 62 HDPE

Categories: [Polymer](#); [Thermoplastic](#); [Polyethylene \(PE\)](#); [HDPE](#)

Material: Made for injection molding applications.

Notes: Information provided by Unipetrol RPA

Vendors: No vendors are listed for this material. Please [click here](#) if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.

[Printer friendly version](#)
[Download as PDF](#)
[Download to Excel \(requires Excel and Windows\)](#)
[Export data to your CADFEA program](#)

Add to Folder: ☐ My Folder ▼

0/0

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	0.980 g/cc	0.0347 lb/in³	ISO 1183
Melt Flow	8.0 g/10 min @Load 2.16 kg, Temperature 190 °C	8.0 g/10 min @Load 4.76 lb, Temperature 374 °F	ISO 1133
	20 g/10 min @Load 5.00 kg, Temperature 190 °C	20 g/10 min @Load 11.0 lb, Temperature 374 °F	ISO 1133
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Shore D	58	58	ISO 888
Tensile Strength, Yield	24.0 MPa	3480 psi	ISO 527
Elongation at Yield	10 %	10 %	ISO 527
Flexural Modulus	0.900 GPa	131 ksi	ISO 178
Charpy Impact, Notched	0.600 J/cm² @Temperature 23.0 °C	2.86 ft-lb/in² @Temperature 73.4 °F	ISO 179
Thermal Properties	Metric	English	Comments
Vicat Softening Point	122 °C	252 °F	ISO 308

Some of the values displayed above may have been converted from their original units and/or rounded in order to display the information in a consistent format. Users requiring more precise data for scientific or engineering calculations can click on the property value to see the original value as well as raw conversions to equivalent units. We advise that you only use the original value or one of its raw conversions in your calculations to minimize rounding error. We also ask that you refer to MatWeb's [terms of use](#) regarding this information. [Click here](#) to view all the property values for this datasheet as they were originally entered into MatWeb.

Users viewing this material also viewed the following:

[Unipetrol PE HD LITEN® VB 33 HDPE](#)  
[Unipetrol PE HD LITEN® MB/ML 71 HDPE](#)  
[Unipetrol PE HD LITEN® MB/ML 47 HDPE](#)  
[Unipetrol PE HD LITEN® MB/ML 87 HDPE](#)  
[Chevron Phillips Marlex® HHM 5202 BN High Density Ethylene Hexene-1 Copolymer](#)

PUNIP044 / 82904

[Subscribe to Premium Services](#)

<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=d3c8475414664e7bb3c5a89804a07078&click=1>

1/2

**Werkstoff 1.2379**

Werkstoff-Nr.: Kurzname:

**1.2379 X153CrMoV12**

DE - Bezeichnung:

**CPPU**Chemische Zusammensetzung:  
(Richtanalyse in %)

C	Cr	Mo	V				
1,55	12,00	0,80	0,90				

Werkstoffeigenschaften:

Ledeburitischer 12 %iger Chromstahl, sehr hoher Widerstand gegen abrasiven und adhäsiven Verschleiß durch hohen Volumenanteil harter Karbide im Gefüge, gute Zähigkeit, maßänderungsarm, hohe Druckfestigkeit, sekundärhärtend, daher als Grundwerkstoff für eine anschließende Nitrierung oder Beschichtung (CVD, PVD, PA-CVD) sehr gut geeignet.

Verwendung:

Schneid- und Stanzwerkzeuge, Kaltscherenmesser, Gewindewalzbacken und -rollen, Fließpresswerkzeuge, Zieh- und Biegewerkzeuge, Bördel- und Richtrollen, Feinschneidwerkzeuge, Tiefziehwerkzeuge, Kunststoffformen bei der Verarbeitung abrasiver Polymere.

Lieferzustand:

Weichgeglüht, max. 255 HB

Physikalische Eigenschaften:

Wärmeausdehnungskoeffizient	$\left[ \frac{10^{-6} \text{ m}}{\text{m K}} \right]$	20-100°C	20-200°C	20-300°C	20-400°C
		10,5	11,5	11,9	13,0
Wärmeleitfähigkeit	$\left[ \frac{\text{W}}{\text{m K}} \right]$	20°C	350°C	700°C	
		16,7	20,5	24,2	

Wärmebehandlung:

Weichglühen	<b>Temperatur</b>	<b>Abkühlung</b>	<b>Glühhärt</b>
	820 - 850°C	Ofen	max. 255 HB
Spannungsarmglühen	<b>Temperatur</b>	<b>Abkühlung</b>	
	600 - 650°C	Ofen	
Härten	<b>Temperatur</b>	<b>Abkühlung</b>	<b>Anlassen</b>
	1000 - 1030°C	Öl, Druckgas (N <sub>2</sub> ), Luft oder Warmbad 500 - 550°C	siehe Kurve ① Im Anlassschaubild, üblicherweise < 300°C
	1040 - 1080°C	Öl, Druckgas (N <sub>2</sub> ), Luft oder Warmbad 500 - 550°C	siehe Kurve ② Im Anlassschaubild, üblicherweise > 480°C

5

Dörrenberg Edelstahl GmbH · Hammerweg 7 · D-51766 Engelskirchen  
Tel.: +49 22 63 / 79 1 · Fax: +49 22 63 / 79 20 5 · [www.doerrenberg.de](http://www.doerrenberg.de)

Ein Unternehmen  
der GESCO Gruppe

**CERTAL**

**Alu Point**  
Alu · Kunststoffe · Metalle

Siemensstraße 10  
31177 Harsum

Tel: +49(0) 5127 8882-0  
Fax: +49(0) 5127 8882-82

**Technisches Merkblatt**
**CERTAL®**  
 EN AW-7022 / AlZn5Mg3Cu

Ausgabe Januar 2012

**EINSATZGEBIET**

Certal® ist eine hochfeste Aluminium-Legierung, die im Hinblick auf **Festigkeit, ausgezeichnete Zerspanbarkeit und Formstabilität** optimiert wurde. Certal® wird vorwiegend im Maschinen-, Werkzeug- und Formen-Bau eingesetzt. Typische Anwendungen sind Druckguss-, Spritzguß- und Blasformen zur Herstellung z.B. von Flaschen, Behältern, Skischuhen.

**VERARBEITUNG****Schweißbarkeit**

- TIG/MIG möglich\*  
Schweißzusatzwerkstoff AA 5183  
AA 5356
- Widerstand gut  
\* es muss mit einem Festigkeitsverlust in der wärmebeeinflussten Zone gerechnet werden; ungeeignet für mechanisch belastete Schweißverbindungen; Auftragschweißen ist unter Beobachtung spezifischer Bedingungen möglich.

**Oberflächenbehandlung****Anodisierbarkeit**

- technisch gut
  - dekorativ gut\*
- \*gelblicher Farbton
- Schleifbarkeit ausgezeichnet  
Hartverchromung gut geeignet  
Vernickelung gut geeignet  
Strukturätzung gut geeignet

**Zerspanung** ausgezeichnet

**VERFÜGBARKEIT**

Die Legierung Certal® ist im Zustand T651 (abgeschreckt – gestreckt – warmausgelagert) in den folgenden Abmessungen lieferbar:

Dicke (über ... bis ...)	Max. Breite
7.9 - 70 mm	2020 mm
70 - 80 mm	1900 mm
80 - 90 mm	1820 mm
90 - 100 mm	1520 mm
100 - 110 mm	1400 mm
110 - 120 mm	1270 mm
120 - 122 mm	1020 mm
122 - 140 mm	930 mm (min. 920)

Für Dicken über 140 mm wird die Legierung Certal® SPC empfohlen.

**CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG (Gewichts-%)**

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti + Zr
max. 0.5	max. 0.5	0.5 1.0	0.1 0.40	2.6 3.7	0.1 0.3	4.3 5.2	max. 0.2

**PHYSIKALISCHE EIGENSCHAFTEN (Richtwerte)**

Dichte	2.78 g/cm <sup>3</sup>
Elastizitätsmodul	72000 MPa
Lin.Wärmeausdehnungskoeffizient (20°-100°C)	23.8 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>
Wärmeleitfähigkeit (Zustand T651)	120 - 150 W/mK
Elektrische Leitfähigkeit (Zustand T651, 20°C)	18 - 22 MS/m

**MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN****Garantierte Minimalwerte (Zustand T651)<sup>1)</sup>**

Dicke (über ... bis ...)	Rm [MPa]	Rp0.2 [MPa]	A50 [%]
7.9 - 12.5 mm	540	460	8
12.5 - 25 mm	540	460	8
25 - 50 mm	530	460	7
50 - 100 mm	500	420	6
100 - 140 mm	490	400	6

1) Diese Werte liegen oberhalb der Normwerte EN AW-7022 T651

**Typische Festigkeitswerte für unterschiedliche Dicken**

Dicke (über ... bis ...)	Rm [MPa]	Rp0.2 [MPa]	A50 [%]	HB
7.9 - 25 mm	555	495	9	170
25 - 100 mm	550	495	8	165
100 - 140 mm	545	490	7	165

**EINSATZGEBIET**

Certal® ist eine hochfeste Aluminium-Legierung, die im Hinblick auf **Festigkeit, ausgezeichnete Zerspanbarkeit und Formstabilität** optimiert wurde. Certal® wird vorwiegend im Maschinen-, Werkzeug- und Formen-Bau eingesetzt.

Typische Anwendungen sind Druckguss-, Spritzguß- und Blasformen zur Herstellung z.B. von Flaschen, Behältern, Skischuhen.

Wenn dieser Werkstoff erhitzt wird, kann seine Festigkeit und / oder Korrosionsbeständigkeit beeinträchtigt werden. Wenn immer ein neuer Einsatz von dieser Legierung beabsichtigt wird, sind dafür bestimmte Eigenschaften wie Korrosionsbeständigkeit, Zähigkeit, Bruchdehnfähigkeit getestet werden, wird das Anwender ausdrücklich empfohlen, mit dem Hersteller einen sorgfältigen Austausch der Werkstoffeigenschaften zu suchen. Die Informationen in dieser Veröffentlichung betreffen nicht eine Garantie der Materialeigenschaften oder Eignung für Fertigung, Zusammenbau, oder Anwendung in einem bestimmten Fall. Der Auftrag zu den technischen Zeichnungen ist integraler Bestandteil dieser Zeichnungen. Das in diesem Anhang enthaltenen Verarbeitungsbefehle sind durch das Vorzeichen Rechnung zu tragen. Constalium Valis AG behält sich das Recht vor, Änderungen in diesem technischen Merkblatt ohne Anhörung vorzunehmen. Diese Angabe ersetzt alle Etiketten Angaben.

**Werkstoff 1.4057**

Werkstoff-Nr.: Kurzname:

**1.4057 X17CrNi16-2**

DE - Bezeichnung:

**R18**Chemische Zusammensetzung:  
(Richtanalyse in %)

C	Cr	Ni					
0,17	16,00	2,00					

Werkstoffeigenschaften:

Nichtrostender martensitischer Stahl.

Verwendung:

Wellen, Maschinenteile in der Papierindustrie, Spindeln, Kolbenstangen, Pumpenteile, Lochplatten.

Lieferzustand:

Vergütet

Physikalische Eigenschaften:

Wärmeausdehnungskoeffizient	$\frac{10^{-6} \text{ m}}{\text{m K}}$	20-100°C	20-200°C	20-300°C	20-400°C
		10,0	10,5	10,5	10,6
Wärmeleitfähigkeit	$\frac{\text{W}}{\text{m K}}$	20°C			
		25,0			

Wärmebehandlung:

Weichglühen  
Eine Doppelglühung kann sinnvoll sein.  
Bitte sprechen Sie uns an.

Temperatur	Abkühlung	Glühhärt
680 - 800°C	Ofen, Luft	max. 295 HB

Härten

Temperatur	Abkühlung	Anlassen
950 - 1050°C	Öl, Druckgas (N <sub>2</sub> ) oder Luft	siehe Anlassschaubild

Mechanische Eigenschaften im vergüteten Zustand (nach DIN EN 10088-3, 08/95)

	QT800		QT900	
Durchmesser d [mm]	60	60 - 160	60	60 - 160
Dehngrenze Rp 0,2 [N/mm <sup>2</sup> ]	min. 600	min. 600	min. 700	min. 700
Zugfestigkeit Rm [N/mm <sup>2</sup> ]	800 - 950	800 - 950	900 - 1050	900 - 1050
Bruchdehnung A5 [%]	L: min. 14	L: min. 12	L: min. 12	L: min. 10
Kerbschlagarbeit ISO-V [J]	L: min. 25	L: min. 20	L: min. 20	L: min. 15

56

Dörrenberg Edelstahl GmbH · Hammerweg 7 · D-51766 Engelskirchen  
Tel.: +49 22 63 / 79 1 · Fax: +49 22 63 / 79 20 5 · [www.doerrenberg.de](http://www.doerrenberg.de)Ein Unternehmen  
der GESCO Gruppe





## **Selbstständigkeitserklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mittweida, den 26.09.2014

Benjamin Swistek